

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

DÉTECTION DE PANNE DANS LES RÉSEAUX OPTIQUES

FEKI SOFIANE

DÉPARTEMENT DE GÉNIE INFORMATIQUE ET GÉNIE LOGICIEL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE INFORMATIQUE)

DÉCEMBRE 2007

© Feki Sofiane, 2007.



Library and
Archives Canada

Bibliothèque et
Archives Canada

Published Heritage
Branch

Direction du
Patrimoine de l'édition

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

ISBN: 978-0-494-36911-1

Our file Notre référence

ISBN: 978-0-494-36911-1

NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé:

DÉTECTION DE PANNE DANS LES RÉSEAUX OPTIQUES

présenté par: FEKI Sofiane

en vue de l'obtention du diplôme de: Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de:

M. PIERRE Samuel, Ph.D., président

M. CHAMBERLAND Steven, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. PESANT Gilles, Ph.D., membre et codirecteur de recherche

M. GAGNON Michel, Ph.D., membre.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier MM Steven Chamberland et Gilles Pesant, mes directeur et codirecteur de recherche, d'avoir accepté de m'encadrer et de m'avoir conseillé et soutenu tout au long de ce projet.

Je remercie également M. Michel Gagnon et M. Samuel Pierre d'avoir accepté de faire partie de mon jury.

Enfin, je profite pour envoyer une pensée à tous les membres de ma famille. Ma reconnaissance est à mon père et à ma mère dont l'éducation, la confiance, l'appui moral et financier m'ont beaucoup aidé. À mes sœurs Malek, Myriam et Fatma, à toute ma famille, à Hichem, Ali, Simon, Oualid et tous mes autres amis, je dis merci pour leurs encouragement et soutien permanent.

Résumé

Les télécommunications ont connu un important développement durant le dernier quart de siècle. De ce fait, la croissance continue d'Internet, l'arrivée massive des connexions à haute vitesse et des applications multimédia ont favorisé une forte explosion de l'offre des services par les opérateurs de télécommunications. Afin d'offrir une grande capacité de transmission tout en garantissant une certaine qualité de services, le monde des réseaux optiques est apparu. Cependant, l'avantage de l'augmentation de la capacité est contrebalancée par la grande quantité d'information qui pourrait être perdue en cas d'une panne. Par conséquent, des mécanismes de détection de pannes sont nécessaires. De ce fait, notre objectif dans ce projet est de proposer un modèle de détection des pannes dans un réseau optique.

Après une brève description des réseaux optiques et de la technologie SONET, nous présenterons les différentes techniques de multiplexage, ainsi que les différents composants d'un réseau optique et les différentes failles qui peuvent exister dans ces derniers. Nous traiterons par la suite, les différents types d'alarmes SONET que nous aurons en cas d'une panne ainsi que leurs méthodes de propagation. Par la suite, nous présenterons deux modèles qui consistent tout d'abord à définir le réseau optique. Dans la deuxième étape, nous introduirons des pannes dans ce dernier et nous générerons des alarmes en se basant sur les alarmes SONET. Ces dernières seront générées à partir d'un générateur d'alarmes que nous implémenterons en C++. Cependant, la méthode que nous utiliserons pour traiter la gestion de ces alarmes se basera sur la programmation par contraintes (PPC). Nous avons choisi cette méthode de résolution puisqu'il y a un rapprochement naturel entre la propagation des contraintes en PPC et la propagation des alarmes. Nous définirons des contraintes à partir de l'état des équipements et les alarmes observées. Nous proposerons ainsi deux algorithmes de résolution en OPL afin de résoudre ces contraintes et proposeront ainsi des diagnostics de pannes tout en tenant

compte de l'aspect temporel des alarmes. Enfin, nous testerons nos deux modèles sur plusieurs réseaux optiques et nous comparerons leurs performances.

Abstract

The telecommunications industry has seen an important development during the last quarter century. The continual growth of Internet and the emergence of high speed communication and multimedia applications results in an overwhelming traffic to be supported by the telecommunications service operators. In order to offer a higher capacity of transmission and to guarantee a certain quality of services, the optical networks have been developed. However, the increase of available capacity can be betrayed by the high quantity of information that can be lost when a failure occurs. Consequently, mechanisms for failure detection are necessary. In such a context, our objective in this project is to propose two mathematical models to locate possible failures in an optical network.

After a short description of optical networks and SONET technology, we present the multiplexing techniques, the optical networks components and the failures that can occur. We treat thereafter the various types of SONET alarms obtained when a failure occurs and we describe the propagation process. Then, we present our methodology which first consists in defining the optical network. In a second step, we randomly generate failures into the network and consequently propagate alarms based on SONET standard. A C++ implementation generates these alarms. Then we propose two constraint programming models to locate the failure. We choose this resolution method because there is a similarity between the propagation of the constraints in PPC and the real propagation of alarms. For that, constraints are defined based on collected states of the equipment. We propose two algorithms of resolution in OPL in order to solve these constraints and we propose a diagnostic of failures taking into account the temporal aspect of alarms. Finally, we test our algorithms on several optical topologies and compare their performance.

Table des matières

| | |
|---|-------|
| Remerciements | iv |
| Résumé | v |
| Abstract | vii |
| Table des matières | viii |
| Liste des tableaux | xi |
| Liste des figures | xiii |
| Liste des sigles et abréviations | xvii |
| Chapitre 1: Introduction générale | 1 |
| 1.1 Introduction | 1 |
| 1.2 Problématique | 2 |
| 1.3 Objectifs | 4 |
| 1.4 Méthodologie | 4 |
| 1.5 Plan du mémoire | 5 |
| Chapitre 2: Introduction aux réseaux optiques | 6 |
| 2.1 Réseau optique | 6 |
| 2.2 SONET | 7 |
| 2.3 Technique de multiplexage | 10 |
| 2.3.1 Multiplexage temporel (TDM) | 11 |
| 2.3.2 Multiplexage fréquentiel (FDM) | 12 |
| 2.3.3 Le principe de WDM | 12 |
| 2.4 Composants d'un système de transmission sur fibre optique | 15 |
| 2.4.1 Interface optique d'émission : transmetteurs | 15 |
| 2.4.2 Fibre optique | 16 |
| 2.4.3 Répéteurs | 18 |
| 2.4.4 Interface optique de réception : récepteur | 19 |
| 2.4.5 Multiplexeur, démultiplexeur et OADM | 19 |

| | |
|--|----|
| 2.4.6 Commutateur (OXC : Optical cross connect) | 20 |
| 2.5 Exemples de défaillance des composants optiques..... | 21 |
| 2.5.1 Panne de la fibre optique..... | 21 |
| 2.5.2 Panne des transmetteurs | 21 |
| 2.5.3 Panne des amplificateurs optiques | 22 |
| 2.5.4 Panne des OADM..... | 22 |
| 2.5.5 Panne des commutateurs OXC..... | 23 |
| 2.6 Les alarmes SONET..... | 24 |
| 2.6.1 Définitions..... | 25 |
| 2.6.2 Propagation des alarmes..... | 26 |
| 2.6.3 Notion de délai dans les réseaux | 30 |
| 2.6.3.1 Délai de propagation | 30 |
| 2.6.3.2 Délai de transmission..... | 31 |
| 2.6.3.3 Délai de traitement..... | 31 |
| 2.7 Revue de littérature | 34 |
| 2.8 Conclusion | 50 |
| Chapitre 3 : Méthode proposée | 51 |
| 3.1 Programmation par contraintes | 52 |
| 3.1.1 Domaine de contraintes..... | 52 |
| 3.1.2 Définition d'un CSP | 52 |
| 3.1.2 Solveur : propagation et filtrage..... | 53 |
| 3.1.2.1 Cohérence de nœud..... | 53 |
| 3.1.2.2 Cohérence d'arc | 54 |
| 3.1.2.3 Cohérence de bornes | 54 |
| 3.1.2.4 Cohérence de domaines..... | 55 |
| 3.2 Les données..... | 56 |
| 3.3 Modèle 1 | 58 |
| 3.3.1 Générateur d'alarmes du modèle 1..... | 58 |
| 3.3.2 Description formelle du problème..... | 61 |

| | |
|---|-----|
| 3.3.3 Modélisation mathématique du modèle 1 | 63 |
| 3.4 Modèle 2 | 71 |
| 3.4.1 Générateur d'alarmes du modèle 2..... | 72 |
| 3.4.2 Modélisation mathématique du modèle 2 | 74 |
| Chapitre 4 : Analyse des résultats | 78 |
| 4.1 Résultats | 78 |
| Chapitre 5 : Conclusion..... | 111 |
| 5.1 Synthèse des travaux | 111 |
| 5.2 Limitations des travaux | 113 |
| 5.3 Travaux futurs | 113 |
| Références | 115 |

Liste des tableaux

| | |
|---|-----|
| Tableau 2.1 : Matrice des alarmes..... | 42 |
| Tableau 2.2 : Matrice des alarmes simplifiée..... | 43 |
| Tableau 2.3 : Matrice finale des alarmes | 43 |
| Tableau 3.1 : Topologie physique: ensemble des liens..... | 56 |
| Tableau 3.2 : Les nœuds de source et de destination des chemins optiques..... | 59 |
| Tableau 3.3 : Les nœuds des chemins optiques | 60 |
| Tableau 3.4 : Les liens formant les chemins optiques | 60 |
| Tableau 3.5 : Les liens et ports correspondants | 61 |
| Tableau 3.6 : Les alarmes des ports des noeuds sources et destinations..... | 61 |
| Tableau 3.7 : Délai du port P3_Tx..... | 73 |
| Tableau 4.1 : Topologie du réseau | 78 |
| Tableau 4.2 : Les chemins optiques | 80 |
| Tableau 4.3 : Les nœuds des chemins optiques | 80 |
| Tableau 4.4 : Les liens des chemins optiques | 80 |
| Tableau 4.5 : Table des alarmes des nœuds sources et destinations | 82 |
| Tableau 4.6 : Table des alarmes des nœuds sources et destinations | 86 |
| Tableau 4.7 : Les chemins optiques | 90 |
| Tableau 4.8 : Les nœuds des chemins optiques | 91 |
| Tableau 4.9 : Les liens des chemins optiques | 91 |
| Tableau 4.10 : Table des alarmes des nœuds sources et destinations | 91 |
| Tableau 4.11 : Données de l'exemple 3..... | 94 |
| Tableau 4.12 : Les chemins optiques | 96 |
| Tableau 4.13 : Les nœuds des chemins optiques | 96 |
| Tableau 4.14 : Les liens des chemins optiques | 96 |
| Tableau 4.15 : Table des alarmes des nœuds sources et destinations | 98 |
| Tableau 4.16 : Les chemins optiques | 101 |
| Tableau 4.17 : Les nœuds des chemins optiques | 101 |

| | |
|--|-----|
| Tableau 4.18 : Les liens des chemins optiques | 102 |
| Tableau 4.19 : Table des alarmes des nœuds sources et destinations | 103 |
| Tableau 4.20 : Les chemin optiques..... | 106 |
| Tableau 4.21 : Table des alarmes des nœuds sources et destinations | 107 |

Liste des figures

| | |
|--|----|
| Figure 1.1 : Réseau d'une entreprise contrôlé par NMS | 3 |
| Figure 2.1 : Un exemple de conduit SONET | 8 |
| Figure 2.2 : Modèle d'architecture en couches du système SONET | 9 |
| Figure 2.3 : Un conteneur de données portant sur deux trames SONET | 10 |
| Figure 2.4 : Multiplexage temporel..... | 11 |
| Figure 2.5 : Multiplexage fréquentiel de 3 canaux | 12 |
| Figure 2.6 : Multiplexage WDM..... | 13 |
| Figure 2.7 : Notion de filtrage des longueurs d'onde | 14 |
| Figure 2.8 : Structure d'un réseau optique utilisant SONET et WDM..... | 14 |
| Figure 2.9 : Une section d'une fibre optique | 16 |
| Figure 2.10 : Bande de fréquences utilisables..... | 17 |
| Figure 2.11: OADM..... | 20 |
| Figure 2.12: OXC..... | 20 |
| Figure 2.13 : La marge du transmetteur | 22 |
| Figure 2.14 : Exemple de panne d'un OADM..... | 23 |
| Figure 2.15 : Base de fonctionnement des alarmes SONET | 26 |
| Figure 2.16 : Scénario1 | 27 |
| Figure 2.17 : Scénario 2 | 27 |
| Figure 2.18 : Scénario 3 | 28 |
| Figure 2.19 : Scénario 4 | 28 |
| Figure 2.20 : Scénario 5 | 29 |
| Figure 2.21 : Scénario 6 | 29 |
| Figure 2.22 : Scénario 7 | 30 |
| Figure 2.23 : Propagation des alarmes | 30 |
| Figure 2.24 : Réception des alarmes P_AIS et P_RDI | 32 |
| Figure 2.25 : Premier cas de propagation des alarmes..... | 32 |
| Figure 2.26 : Deuxième cas de propagation des alarmes | 32 |

| | |
|---|----|
| Figure 2.27 : Réception des alarmes P_AIS et P_RDI à un temps donné | 33 |
| Figure 2.28 : Propagation des alarmes et temps de propagation..... | 33 |
| Figure 2.29 : Réseau optique..... | 35 |
| Figure 2.30 : Arbre binaire..... | 37 |
| Figure 2.31: Arbre binaire complet..... | 38 |
| Figure 2.32 : Arbre binaire avec $m1=1, m2=0$ | 39 |
| Figure 2.33 : Arbre binaire avec $m1=0, m2=1$ | 40 |
| Figure 2.34 : Arbre binaire avec $m1=1, m2=1$ | 40 |
| Figure 2.35 : Réseau optique composé par 8 nœuds..... | 41 |
| Figure 2.36 : Emplacement des microcontrôleurs au niveau des nœuds | 42 |
| Figure 2.37 : Réseau 'a' et son graphe de dépendance 'b'..... | 44 |
| Figure 2.38 : Graphe de dépendance..... | 45 |
| Figure 2.39 : Algorithme de Katzela..... | 46 |
| Figure 2.40 : Correspondance entre les alarmes et leurs domaines | 48 |
| Figure 2.41 : Corrélation des alarmes en utilisant la méthode de Karnaugh | 49 |
| Figure 3.1 : Réseau obtenu à partir des données du tableau 3.1 | 57 |
| Figure 3.2 : Réseau optique avec trois chemins optiques | 58 |
| Figure 3.3 : Réseau optique avec les liens correspondants | 60 |
| Figure 3.4 : Exemple pour la contrainte 1 | 64 |
| Figure 3.5 : Exemple pour la contrainte 2..... | 64 |
| Figure 3.6 : Exemple pour la contrainte 3..... | 66 |
| Figure 3.7 : Exemple pour la contrainte 4..... | 66 |
| Figure 3.8 : Exemple pour la contrainte 5..... | 67 |
| Figure 3.9 : Exemple pour la contrainte 6..... | 68 |
| Figure 3.10 : Exemple pour la contrainte 7..... | 69 |
| Figure 3.11 : Exemple pour la contrainte 9..... | 70 |
| Figure 3.12 : Réseau optique avec les distances correspondants..... | 74 |
| Figure 4.1 : Réseau du premier exemple..... | 79 |
| Figure 4.2 : Réseau avec les trois chemins optiques..... | 81 |

| | |
|---|-----|
| Figure 4.3 : Les alarmes que le gestionnaire de réseau reçoit..... | 82 |
| Figure 4.4 : Résultats du modèle 1 affichés par OPL | 84 |
| Figure 4.5 : Résultats du modèle 2 affichés par OPL | 85 |
| Figure 4.6 : Propagation des alarmes détaillée..... | 85 |
| Figure 4.7 : Les alarmes que le gestionnaire de réseau reçoit..... | 86 |
| Figure 4.8 : Résultats du modèle 1 affichés par OPL | 88 |
| Figure 4.9 : Résultats du modèle 2 affichés par OPL | 89 |
| Figure 4.10 : Propagation des alarmes détaillée..... | 89 |
| Figure 4.11 : Réseau avec les trois chemins optiques..... | 90 |
| Figure 4.12 : Les alarmes que le gestionnaire de réseau reçoit..... | 91 |
| Figure 4.13 : Résultats du modèle 1 affichés par OPL | 92 |
| Figure 4.14 : Résultats du modèle 2 affichés par OPL | 92 |
| Figure 4.15 : Propagation des alarmes détaillée..... | 93 |
| Figure 4.16 : Réseau obtenu du troisième exemple | 95 |
| Figure 4.17 : Réseau avec les trois chemins optiques..... | 97 |
| Figure 4.18 : Les alarmes que le gestionnaire de réseau reçoit..... | 98 |
| Figure 4.19 : Résultats du modèle 1 affichés par OPL | 99 |
| Figure 4.20 : Résultats du modèle 2 affichés par OPL | 99 |
| Figure 4.21 : Propagation des alarmes détaillée..... | 100 |
| Figure 4.22 : Réseau obtenu..... | 102 |
| Figure 4.23 : Les alarmes que le gestionnaire de réseau reçoit..... | 103 |
| Figure 4.24 : Résultats du modèle 1 affichés par OPL | 104 |
| Figure 4.25 : Résultats du modèle 2 affichés par OPL | 105 |
| Figure 4.26 : Propagation des alarmes détaillée..... | 105 |
| Figure 4.27 : Topologie du réseau..... | 106 |
| Figure 4.28 : Les alarmes que le gestionnaire de réseau reçoit..... | 107 |
| Figure 4.29 : Résultats du modèle 1 affichés par OPL | 108 |
| Figure 4.30 : Résultats du modèle 2 affichés par OPL | 108 |
| Figure 4.31 : Propagation des alarmes détaillée..... | 109 |

| | |
|---|-----|
| Figure 4.32 : Effet du nombre de chemins optiques sur le temps de détection de la panne | |
| | 110 |
| Figure 4.33 : Effet de la taille des réseaux optiques sur le temps de détection de la panne | |
| | 110 |

Liste des sigles et abréviations

| | |
|--------------|--|
| ADF | Add drop filter |
| OADM | Optical add drop multiplexing |
| OXC | Optical cross connect |
| LOS | Loss of signal |
| AIS | Alarm indication signal |
| RDI | Remote defect indication |
| OOF | Out of frame |
| LOF | Loss of frame |
| L-RDI | Line remote defect indication |
| P-RDI | Path remote defect indication |
| NMS | Network management system |
| WDM | Wavelength Division multiplexing |
| PDA | Partially Depleted Absorber |
| SONET | Synchronous Optical Network |
| SDH | Synchronous Digital Hierarchy |
| OPL | Optimization Programming Language |
| SPE | Synchronous Payload Envelope |
| PPC | Programmation par contraintes |
| OPL | Optimization Program languages |
| CSP | Problèmes de Satisfaction de Contraintes |
| SOH | Section Overhead |
| LOH | Line Overhead |
| POH | Path Overhead |
| FDM | Frequency Division Multiplexing |
| TDM | Time Division Multiplexing |
| EDFA | Erbium Doped Fiber Amplifier |

Chapitre 1: Introduction générale

1.1 Introduction

Les télécommunications par fibre optique ont connu une forte explosion ces deux dernières décennies. La fibre optique constitue aujourd'hui une alternative rentable pour les transmissions de moyenne ou de longue portées.

Avec plus de 10 millions de kilomètres fabriqués par an, les fibres optiques sont à pleine maturité, elles diffusent dans des domaines d'application de plus en plus vastes. Elles tirent avantage de la performance de transmission (très faible atténuation, très grande bande passante et multiplexage de plusieurs signaux), de la facilité de mise en œuvre (faible poids et grande souplesse) et de la sécurité électrique (la fibre n'est pas sensible aux parasites, les terminaux sont totalement isolés et les puissances optiques utilisées sont faibles et non dangereuses).

De ce fait, les utilisateurs et le nombre de services proposés augmentent sans cesse. Ceci implique une augmentation de la quantité d'équipements des réseaux ainsi qu'une complexité croissante de leur fonctionnement. En l'occurrence, la gestion des réseaux s'est développée.

Cinq domaines de gestion sont définis; les anomalies, la sécurité, les configurations, les performances et la comptabilité. Nous nous intéresserons à la gestion des anomalies. Cela consiste à détecter, identifier et corriger les fonctionnements anormaux du réseau que nous désignons par le terme *panne*. Une grande quantité d'information peut être perdue au moment d'une panne. Des centaines de canaux, traversant la même fibre, peuvent être affectés. Des mécanismes de détection et de localisation des pannes sont par conséquent nécessaires.

Dans ce premier chapitre, nous décrirons tout d'abord la problématique. Ensuite, nous préciserons nos objectifs de recherche, notre méthodologie et enfin, nous présenterons le plan du mémoire.

1.2 Problématique

Un système de gestion des réseaux NMS (Network management system) est nécessaire pour gérer les réseaux. Ceci permet à l'opérateur d'administrer plus efficacement son réseau. Les principales fonctions d'un NMS sont :

- la gestion des pannes : cette fonction inclut la détection et la correction des pannes à partir des alarmes reçues;
- la gestion des configurations : cette fonction permet d'effectuer facilement des modifications sur le réseau, qui permet d'installer, de maintenir et de faire la mise à jour de ces composants;
- la gestion de comptabilité : cette fonction permet de détecter les inefficacités d'un réseau et
- la gestion de performance : cette fonction permet d'identifier les problèmes qui pourront toucher à la performance d'un réseau.

Supposons que nous avons une entreprise ayant plusieurs succursales (figure 1.1). En cas de panne d'un composant appartenant à un réseau d'une succursale donnée, plusieurs alarmes seront envoyées au gestionnaire de ce réseau. De ce fait, il y aura une propagation des alarmes sur les différents NMS. Donc, l'administrateur du réseau doit trouver les pannes à partir de plusieurs NMS qui sont souvent contrôlés par des groupes administratifs différents, ce qui peut être un peu laborieux. En plus, si nous prenons le cas des réseaux SONET (Synchronous Optical Network) à grande capacité, une seule panne d'un équipement peut déclencher des centaines et mêmes des milliers d'alarmes actives sur les NMS. Par ailleurs, il est difficile de faire la corrélation de celles-ci afin de

trouver la panne exacte et ce, surtout lorsque le nombre d'alarmes est élevé. Ceci aura un fort impact sur la détection des pannes.

Plusieurs méthodes ont été développées dans la littérature afin de résoudre ce problème. Elles se basent sur la corrélation d'alarmes en permettant de filtrer, trier et regrouper ces dernières pour savoir quelles pannes ont eu lieu. Un effort moins important est consacré aux algorithmes implantés dans les composants de gestion. En plus, le concept temporel de propagation des alarmes a été négligé.

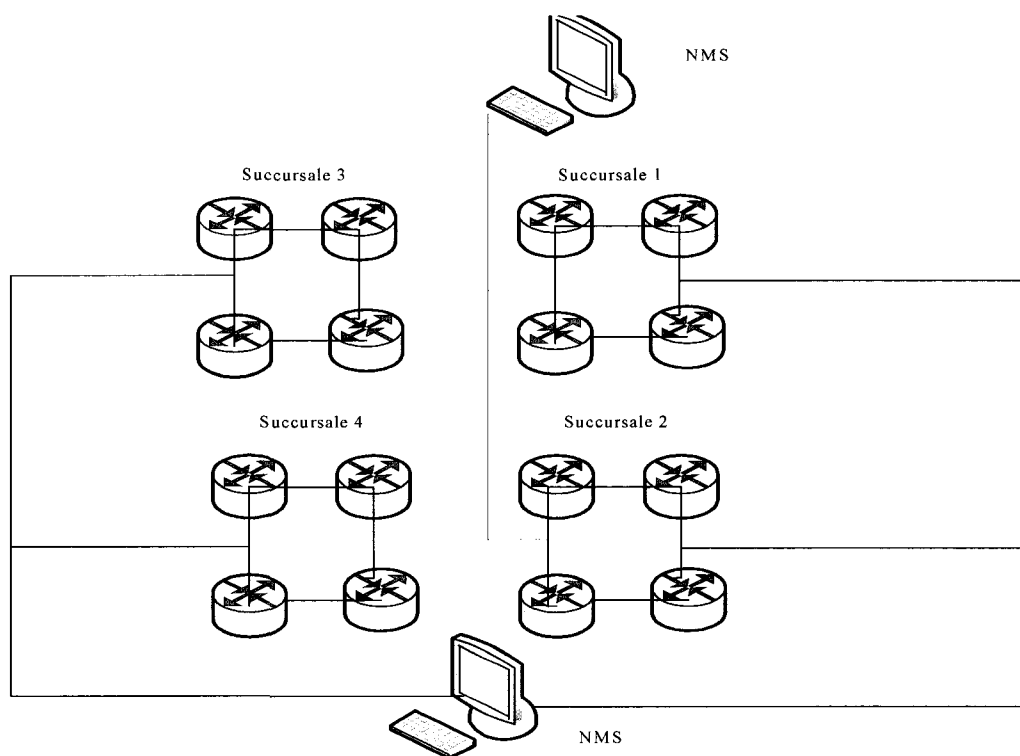


Figure 1.1 : Réseau d'une entreprise contrôlé par NMS

1.3 Objectifs

Notre objectif général est de proposer un modèle de détection des pannes dans un réseau optique. Plus spécifiquement, les objectifs sont :

- faire une étude de l'état de l'art sur les différentes approches qui ont été proposées dans la littérature afin de localiser les pannes dans un réseau optique;
- proposer un modèle de gestion des alarmes en se basant sur les alarmes SONET. Nous définirons ainsi des contraintes à partir de l'état de l'équipement et des alarmes observées;
- proposer un algorithme de résolution qui se basera sur la programmation par contraintes afin de résoudre les contraintes proposées et
- implémenter et évaluer les performances de notre méthode de résolution.

1.4 Méthodologie

Notre méthode utilisée pour traiter la gestion des alarmes se base sur la programmation par contraintes (PPC). Nous avons choisi cette méthode de résolution puisqu'il y a un rapprochement entre la propagation des contraintes en PPC et la propagation des alarmes. En plus, l'intérêt de cette méthode est la résolution de problèmes d'optimisation combinatoire dans le domaine de l'aide à la décision où elle a largement fait ses preuves.

Cependant, notre méthodologie de recherche consiste tout d'abord à définir les différents équipements de notre modèle du réseau optique et les différentes interfaces avec les NMS. Dans la deuxième étape, nous introduirons des pannes dans ce dernier et nous générerons la propagation des alarmes SONET. Ainsi, des contraintes seront définies à partir de l'état des équipements et les alarmes observées. Enfin, le modèle de

propagation par contraintes implanté en OPL (Optimization Programming Language), propose alors des diagnostics de pannes.

1.5 Plan du mémoire

Le mémoire est constitué de cinq chapitres. Suite à ce premier chapitre d'introduction, le deuxième chapitre présente une brève description des réseaux optiques, des techniques de multiplexage, des différents composants d'un réseau optique, des différentes failles qui peuvent exister dans ces composants et des alarmes. Nous définirons par la suite ces dernières et leurs méthodes de propagation. Nous conclurons ce premier chapitre en présentant les différentes méthodes qui ont été utilisées dans la littérature afin de détecter les pannes.

Dans le troisième chapitre, nous présenterons notre méthodologie qui nous permettra de trouver l'emplacement des pannes.

Nos résultats seront présentés dans le quatrième chapitre. Une discussion de ces derniers sera aussi présentée dans ce chapitre. Enfin, le cinquième chapitre conclut en faisant une synthèse des travaux réalisés et des résultats obtenus. Nous présenterons aussi dans ce chapitre des possibilités de travaux futurs découlant de notre sujet de recherche.

Chapitre 2: Introduction aux réseaux optiques

2.1 Réseau optique

La fin du vingtième siècle a été marquée par un important développement des télécommunications. La croissance continue d'Internet, l'arrivée massive des connexions à haute vitesse et des applications multimédia ont favorisé une forte explosion de l'offre des services par les opérateurs de télécommunications. Leur objectif est d'intégrer différents types de service, ayant de grandes capacités en milieu urbain ou sur de longues distances, tout en garantissant une certaine qualité de service. D'où la naissance des réseaux optiques.

La fibre optique permet de transmettre des signaux lumineux à la place des signaux électriques. Les avantages sont nombreux. On peut citer, par exemple, la très bonne immunité par rapport aux bruits électromagnétiques externes et la transmission avec un taux d'erreur très bas tout en ayant une grande bande passante.

Afin de réaliser le passage de plusieurs signaux lumineux, il faut faire appel à un multiplexage en longueur d'onde qui, en succédant à deux autres modes de modulation, a marqué l'univers des réseaux à haut débit. Le deuxième élément qui a marqué la promotion des réseaux optiques est la norme SONET.

Dans ce chapitre, nous traiterons la technologie SONET. Nous présenterons les deux modes de multiplexage qui ont favorisé la naissance de la technologie WDM. Nous décrirons par la suite les différents éléments d'un réseau optique ainsi que quelques exemples de failles de ces derniers. Une correspondance entre SONET, WDM sera aussi traitée et nous conclurons le chapitre en décrivant les alarmes SONET.

2.2 SONET

Plusieurs compagnies de téléphonies locales devaient se connecter aux artères à haut débit des sociétés opératrices de réseaux à longues distances. De ce fait, elles ont commencé à développer leurs propres réseaux de communication qui consistaient à connecter les réseaux téléphoniques des grands opérateurs ayant des systèmes TDM (Time Division Multiplexing) optiques différents. En l'occurrence, le principe de la normalisation de ses différents standards est devenu très important. D'où l'apparition de SONET (Synchronous Optical Network).

SDH (Synchronous Digital Hierarchy) correspond à une vision spécifique de SONET, demandée par les européens. Nous orienterons nos recherches plutôt vers SONET qui est plus utilisée en Amérique du nord. Toutefois, les différences entre ces deux technologies sont très minces.

SONET répond à quatre objectifs principaux :

- favoriser une interconnexion de systèmes à haut débit grâce à la normalisation de la trame et des interfaces optiques correspondantes. De ce fait, SONET a été désigné grâce à son architecture de synchronisation, à sa structure de trame et à l'utilisation des longueurs d'ondes;
- avoir un compromis entre les différents systèmes numériques américain, européen et japonais;
- avoir une souplesse accrue quant à la possibilité de multiplexer les artères numériques et d'atteindre un haut débit de transmission et
- avoir une meilleure exploitation, administration et maintenance du système.

Dans la terminologie SONET [8], on appelle '*Section*' toute liaison optique directe entre deux équipements sans intermédiaire. Un lien de communication entre deux multiplexeurs, incluant un ou plusieurs répéteurs intermédiaires est appelé une '*ligne*' (Line). Enfin, la partie '*conduit*' (path) représente la liaison globale entre la source et la

destination, passant par un ou plusieurs multiplexeurs, incluant un ou plusieurs répéteurs (figure 2.1). Nous décrivons plus en détail le rôle du répéteur et du multiplexeur dans la section 2.4.

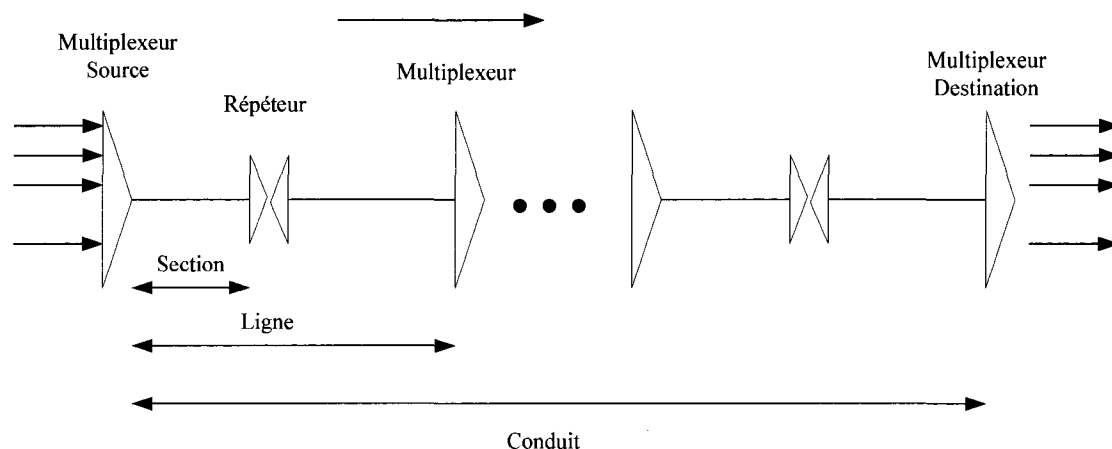


Figure 2.1 : Un exemple de conduit SONET

La couche physique du système SONET est subdivisée en quatre sous-couches, comme le montre la figure 2.2. La plus basse sous-couche est appelée couche photonique. Elle concerne les propriétés physiques de la fibre optique et du signal lumineux. La sous-couche section gère le flux de bit sur le lien optique sans aucune action ni traitement de la trame. La sous-couche ligne ne s'intéresse qu'à l'échange de la trame entre deux multiplexeurs sans changement quelque soit le nombre de répéteurs sur la ligne. Enfin, la sous-couche conduit s'intéresse à la communication de bout en bout entre les deux extrémités d'un conduit.

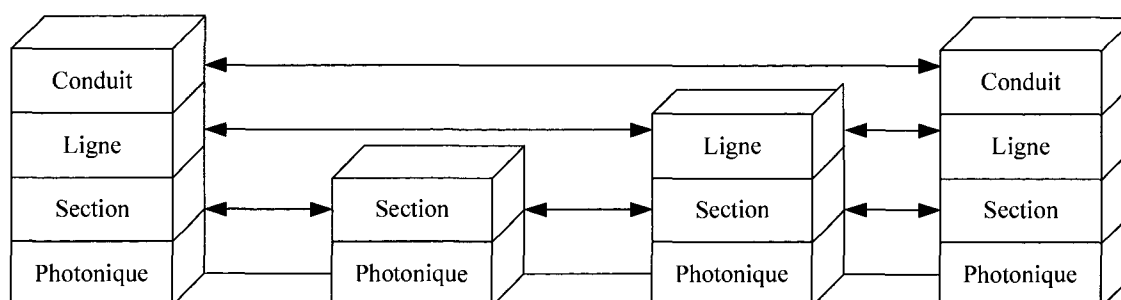


Figure 2.2 : Modèle d'architecture en couches du système SONET

SONET décrit la forme d'une trame synchrone, sous forme d'un bloc de 810 octets, qui sera émise toutes les 125 microsecondes. Elle est décrite sous forme d'une grille de 90 colonnes par 9 lignes, comme illustré à la figure 2.3. Les trois premières colonnes sont réservées aux informations de gestion du système, appelées surdébit. Cependant, les trois premières lignes de cette partie correspondent au surdébit de section (SOH, Section Overhead) et les six suivantes correspondent au surdébit de ligne (LOH, Line OverHead). Les 87 colonnes restantes représentent les données. Cette partie est appelée *conteneur de données*, ou SPE (Synchronous Payload Envelope). Le conteneur de données contient les données utilisateur et un surdébit de conduit, POH (path overhead). Le conteneur ne commence pas obligatoirement à partir de la quatrième colonne de la première ligne. Il peut commencer à n'importe où dans la trame. Cependant, un pointeur fait référence à la localisation du premier octet du conteneur.

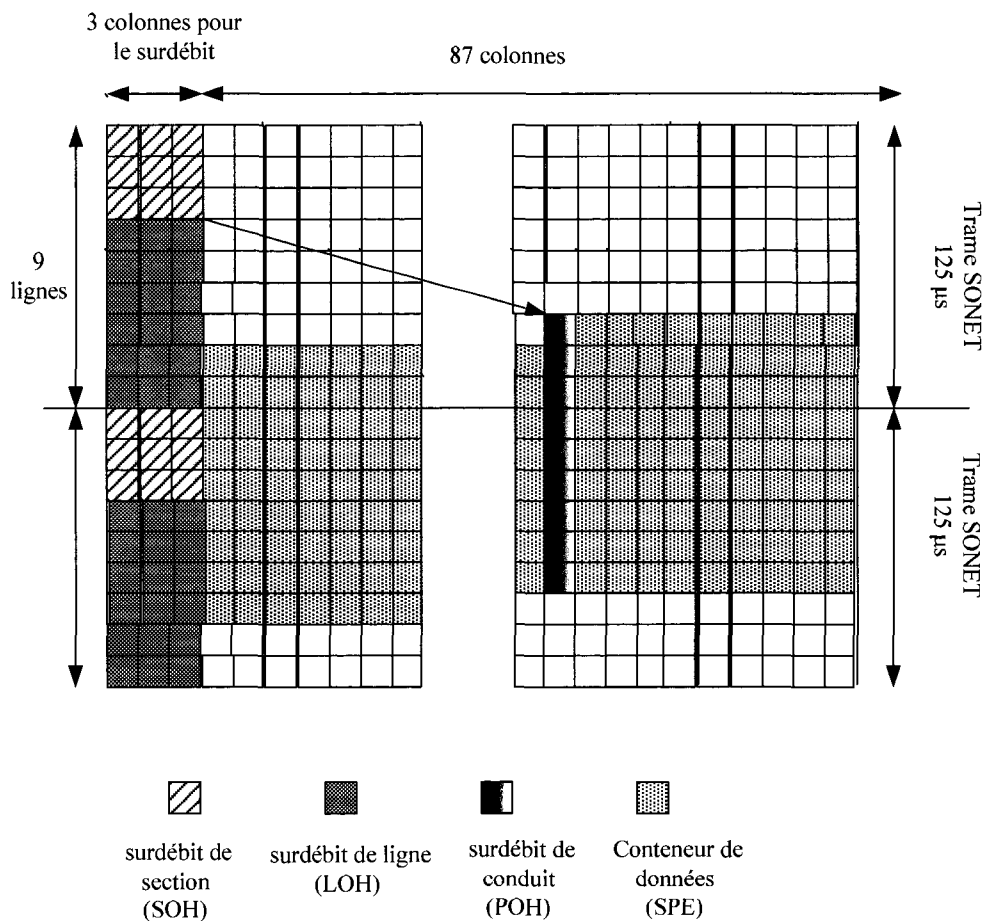


Figure 2.3 : Un conteneur de données portant sur deux trames SONET

2.3 Technique de multiplexage

Afin d'augmenter leurs capacités de transmission, la technologie des réseaux a connu plusieurs évolutions en se basant sur la technique de multiplexage. Cette méthode consiste à regrouper plusieurs communications sur un même support de transmission. Ces techniques se répartissent en deux grandes catégories [16] : le multiplexage temporel TDM (Time Division Multiplexing) et le multiplexage fréquentiel FDM (Frequency division multiplexing).

2.3.1 Multiplexage temporel (TDM)

Le multiplexage par répartition temporelle (TDM) consiste à affecter à un utilisateur unique la totalité de la bande passante pendant un court instant et à tour de rôle pour chaque utilisateur. En l'occurrence, l'allocation de la bande passante se fait en divisant l'axe du temps en durée fixe, et un canal ne va transmettre que durant ces périodes déterminées.

À la réception, chaque canal est 'démultiplexé' puis acheminé vers son destinataire. L'inconvénient de TDM est que tous les canaux utilisés sont dans la même fibre. Ainsi, en cas de panne d'une fibre, tous les canaux sont interrompus et, en conséquence, on perd la synchronisation.

La technologie SONET utilisée comme technique de transport dans les réseaux téléphoniques des grands opérateurs pratiquait un multiplexage temporel pour assembler plusieurs lignes en une seule ligne de débit supérieur. L'inconvénient de ce type de multiplexage est que l'accès ou l'insertion d'une information dans un canal oblige à démultiplexer l'ensemble de tout le train numérique traversant le canal.

Un exemple de multiplexage temporel est illustré à la figure 2.4 où on a N signaux qu'on veut multiplexer temporellement.

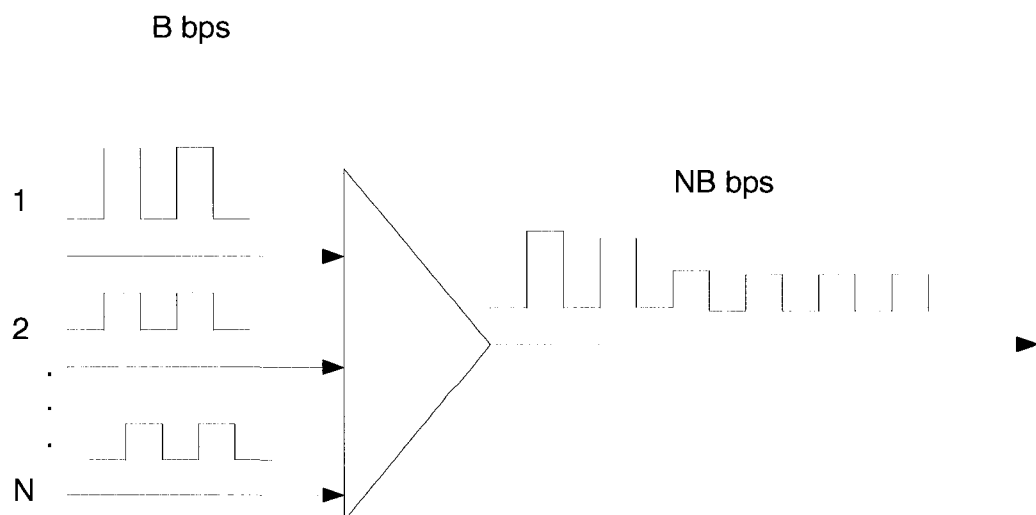


Figure 2.4 : Multiplexage temporel

2.3.2 Multiplexage fréquentiel (FDM)

Cette technique se base sur la répartition des fréquences. Elle est utilisée pour accroître les débits sur paire torsadée et plus particulièrement des lignes téléphoniques. Le multiplexage fréquentiel divise le spectre des fréquences disponibles en bandes plus étroites dont chacune est affectée à un utilisateur. Un exemple de multiplexage fréquentiel de trois canaux est illustré à la figure 2.5.

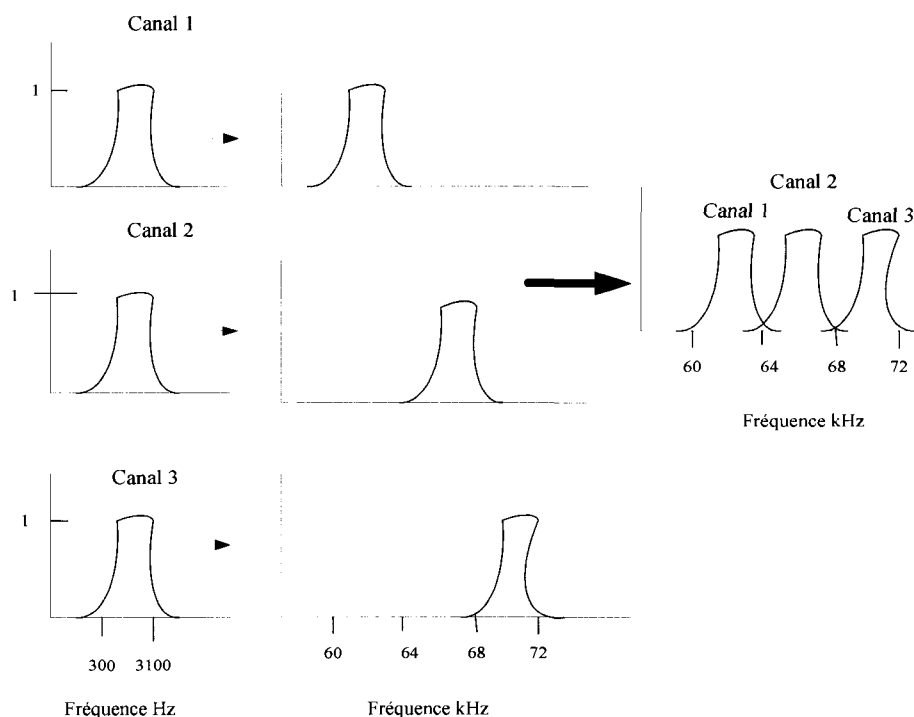


Figure 2.5 : Multiplexage fréquentiel de 3 canaux

2.3.3 Le principe de WDM

Pour la transmission sur fibre optique, on a recourt à une variante du multiplexage fréquentiel appelé multiplexage en longueur d'onde ou WDM (Wavelength Division Multiplexing). Cependant, sur une fibre optique, il est possible d'utiliser

plusieurs longueurs d'onde simultanément. C'est justement sur ce principe qu'une technique de modulation a été mise en place.

L'idée est de reprendre le multiplexage fréquentiel utilisé dans les réseaux électriques pour l'appliquer dans le domaine optique. Ce multiplexage fréquentiel se produit simplement à de très hautes fréquences.

Ainsi, le multiplexage en longueur d'onde permet de maximiser l'utilisation des fibres optiques en permettant à une seule fibre de transporter plusieurs communications en même temps. Pour ce faire, des flux de longueurs d'ondes différentes sont combinés pour être acheminés sur une seule fibre optique jusqu'à la destination. Un exemple de multiplexage et de démultiplexage des longueurs d'onde est illustré à la figure 2.6.

À la destination, le faisceau de longueur d'ondes est séparé en autant de fibres qu'il y en avait au départ grâce aux filtres qui éliminent toutes les longueurs d'onde sauf une. Un exemple de filtrage est illustré à la figure 2.7 où il y a quatre longueurs d'ondes à transmettre sur une seule fibre optique.

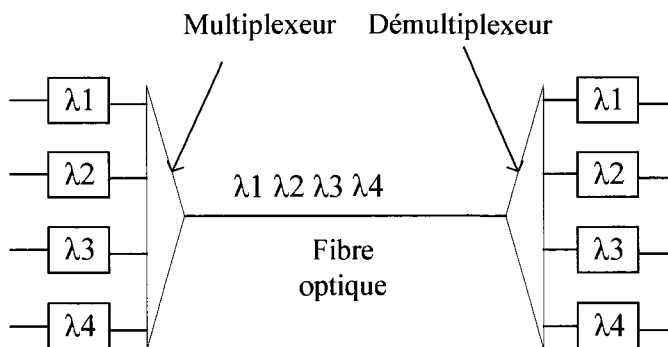


Figure 2.6 : Multiplexage WDM

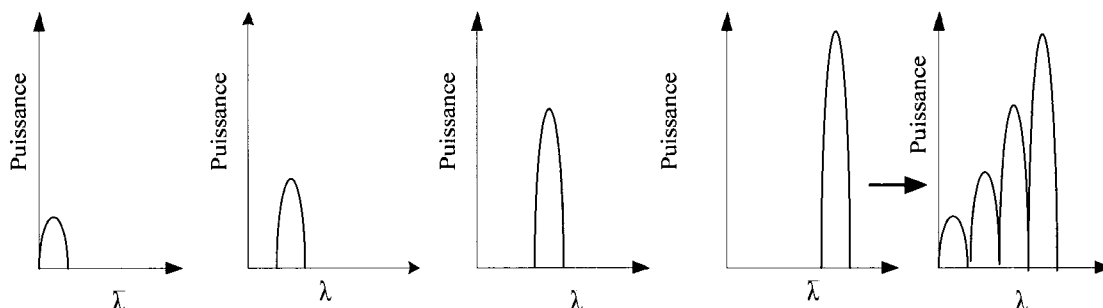


Figure 2.7 : Notion de filtrage des longueurs d'onde

La raison du succès du multiplexage WDM est que la largeur du faisceau transporté par une seule fibre atteint les gigahertz. En utilisant les canaux parallèles avec des longueurs d'onde distinctes, la bande passante augmente linéairement en fonction du nombre de canaux.

Comme pour la technique de TDM, les canaux traversent à l'aide du multiplexage WDM la même fibre. Cependant, en cas de panne de cette dernière, le canal qui la traverse est interrompu.

De nos jours, les utilisations de SONET et WDM se multiplient. Les réseaux qui se basent sur ces technologies sont actuellement en pleine expansion partout dans le monde. De ce fait, les réseaux optiques ont intégré les points forts de SONET : fiabilité des transmissions et gestion de la bande passante.

Ainsi, un réseau optique utilisant SONET et WDM a la structure suivante :

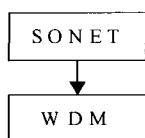


Figure 2.8 : Structure d'un réseau optique utilisant SONET et WDM

Nous avons traité dans les sections précédentes les technologies SONET et WDM qui ont révolutionné les réseaux optiques. Nous aborderons dans les sections suivantes les différents composants d'un réseau optique, se basant sur ces technologies, ainsi que les failles qu'ils peuvent subir.

2.4 Composants d'un système de transmission sur fibre optique

Dans une liaison point à point, nous trouvons [5] :

- l'interface optique d'émission composée par le transmetteur;
- la fibre optique;
- un répéteur, qu'on insère dans la liaison lorsque cette dernière le nécessite, composé par une interface optique de réception et d'émission reliée par des circuits d'amplifications et
- une interface optique de réception représentée par le récepteur.

2.4.1 Interface optique d'émission : transmetteurs

Un émetteur consiste à transformer le signal électrique en un signal optique. Ce passage se fait grâce aux composants optoélectroniques qui peuvent être soit une diode électroluminescente (DEL) ou une diode laser (DL). Leurs structures consistent à moduler le courant dans la diode et à émettre de la lumière lorsqu'il est parcouru par un courant électrique. L'une des plus importantes différences entre ces deux types d'émetteurs est au niveau de transmission. Les diodes laser transmettent sur de longues distances tandis que les diodes électroluminescentes transmettent sur de courtes distances.

2.4.2 Fibre optique

Une fibre optique est un fil de verre transparent très fin qui a la propriété de conduire la lumière entre deux lieux distants de plusieurs centaines, voire milliers, de kilomètres. Ces rayons lumineux sont capables de supporter une grande quantité d'information qui peuvent transiter aussi bien la télévision, le téléphone, la visioconférence ou les données informatiques.

La fibre est constituée par un cœur autour duquel on trouve une gaine. L'ensemble est recouvert par une gaine protectrice comme illustré à la figure 2.9. Les fibres optiques ont connu une évolution importante : le passage de la fibre multimode à la fibre monomode [6].

Le terme multimode signifie que la lumière se répartit sur un certain nombre de trajectoires autorisées, appelées modes. Le type le plus simple de la fibre multimode est la fibre à saut d'indice. Dans cette structure, le cœur d'indice de réfraction n_1 , est entouré d'une gaine optique d'indice n_2 légèrement inférieur. Cette fibre génère une grande dispersion des signaux et donc, une déformation du signal reçu. Par la suite, on trouve les fibres à gradient d'indice qui ont été spécialement conçues afin de minimiser cet effet de dispersion. Enfin, il y a eu un passage aux fibres monomodes où il n'y a plus de dispersion intermodale. En effet, le cœur est si fin que le chemin de propagation est pratiquement direct. En l'occurrence, l'avantage principal de ce type de fibre est sa très grande bande passante, permettant les transmissions à très grande distances.

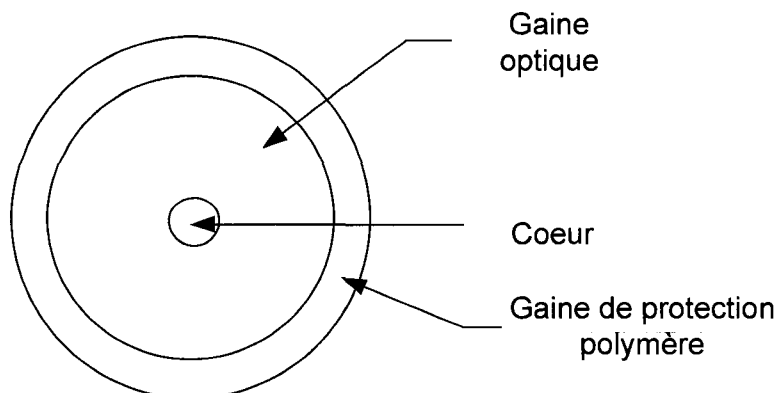


Figure 2.9 : Une section d'une fibre optique

L'atténuation de la fibre optique est faible si on la compare à celle des autres supports de transmission comme le cuivre. Ceci n'empêche pas qu'il y a plusieurs paramètres qui contribuent à faire perdre la puissance au signal optique. De ce fait, nous introduisons la notion des fenêtres spectrales de transmissions.

Les meilleures fenêtres de transmissions optiques sont celles qui minimisent les trois différents phénomènes physiques suivants qui provoquent l'atténuation :

- l'effet de Rayleigh qui traduit l'effet des impuretés, des imperfections, des craquelures et des variations d'indice;
- l'effet de l'absorption par les ions OH^- (oxygène hydrogène). Les impuretés de la fibre se présentent sous forme de molécule absorbant la lumière à des fréquences spécifiques notamment dans la bande 1400 nm – 1500nm (figure 2.10 [21]) et
- l'absorption du verre. Aux fréquences élevées (longueurs d'ondes supérieures à 1600 nm), les molécules de verre commencent à absorber la lumière.

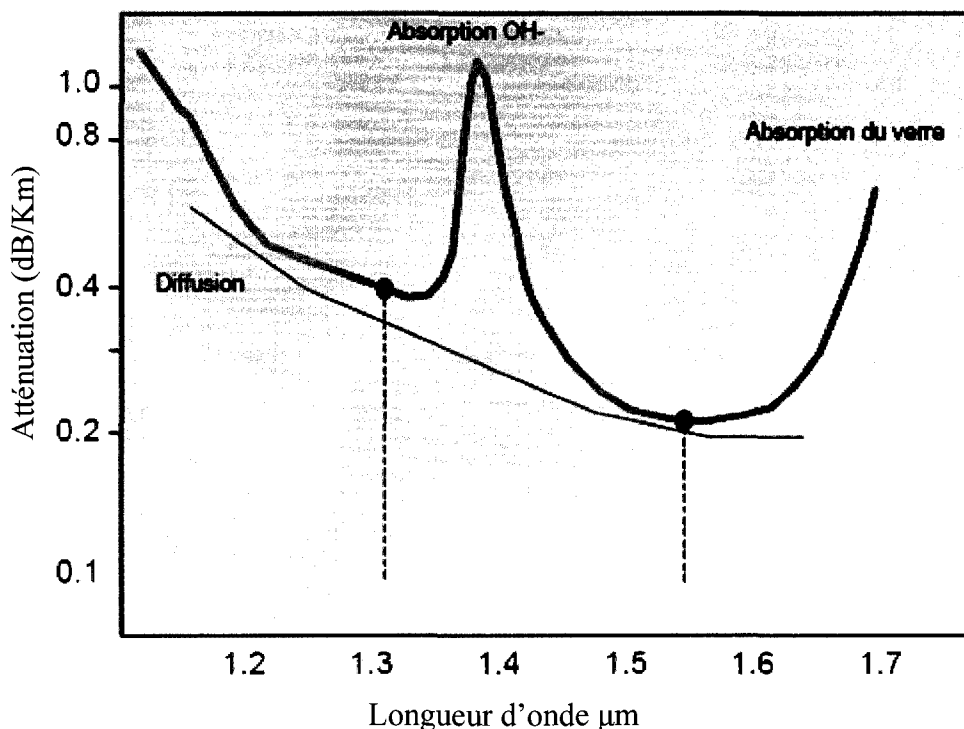


Figure 2.10 : Bande de fréquences utilisables

Du fait des facteurs d'atténuation de la longueur d'onde, les fibres peuvent être utilisées pour la transmission essentiellement dans deux fenêtres spectrales :

- la fenêtre à 1300 nm, qui a une largeur de bande de 50 nm et une atténuation moyenne d'environ 0.4 dB/km, utilisée pour les systèmes de télécommunications de courte portée et
- la fenêtre à 1550 nm, qui a une largeur de bande de 100 nm et une atténuation moyenne d'environ 0.2 dB/km utilisée pour les systèmes de télécommunications de longue portée.

Cependant, il n'est pas possible de supprimer tous les effets qui atténuent le signal. De ce fait, le signal doit être amplifié régulièrement. D'où l'utilisation des amplificateurs EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier) que nous traiterons dans la section suivante.

2.4.3 Répéteurs

Lorsque la longueur de la liaison est grande, on utilise des répéteurs qui contiennent des interfaces d'émission et de réception reliées par des circuits d'amplification.

Ainsi, nous trouvons le répéteur (OEO) qui permet de convertir le signal optique en un signal électrique, auquel nous ferons l'amplification grâce à l'amplificateur (EDFA) à fibre dopée d'erbuim, ensuite nous le reconvertissons en un signal optique qui sera acheminé vers la destination.

L'EDFA est un amplificateur à fibre dopée d'erbuim. Le dopage est une technique qui consiste à insérer un composant chimique dans la fibre ayant des propriétés intéressantes. Les ions d'Erbuim sont excités par les longueurs d'ondes suivantes : 514, 532, 667, 800, 980, 1480 nm.

Cette excitation donne plus d'énergie aux ondes qui traversent la fibre et en l'occurrence, de l'énergie photonique est libérée. Ce phénomène est appelé phénomène de RAMAN.

2.4.4 Interface optique de réception : récepteur

Le récepteur reçoit le signal optique et le convertit en un signal électrique. Ce passage se fait grâce aux photodiodes qui sont des composants semi-conducteurs ayant la capacité de détecter un rayonnement du domaine optique et de le transformer en signal électrique.

En juxtaposant une zone dopée P et une zone dopée N à l'intérieur d'un cristal de semi-conducteur, on obtient une jonction PN. Ainsi, la diode en électronique est constituée d'une jonction PN. Cette configuration de base fut améliorée par l'introduction d'une zone intrinsèque pour constituer la photodiode PIN. Ainsi, en absence de polarisation, elle génère une tension (mode photovoltaïque). En polarisation inverse, elle génère un courant (mode photoampérique ou photocourant).

Le signal reçu étant souvent très faible, il est nécessaire d'amplifier le photocourant. Cependant, on utilise un composant à gain interne qu'on appelle : la photodiode à avalanche (PDA).

2.4.5 Multiplexeur, démultiplexeur et OADM

Le rôle d'un multiplexeur consiste à combiner les signaux optiques, ayant des longueurs d'ondes différentes, dans une seule fibre optique alors qu'un démultiplexeur, sépare les différentes longueurs d'onde combinées dans des signaux optiques indépendants.

L'OADM (Optical add drop multiplexing) est un composant optique qui peut être implanté avec les multiplexeurs et les démultiplexeurs. Ceci consiste à insérer ou enlever des longueurs d'onde comme illustré à la figure 2.11. Grâce aux OADMs, chaque nœud récupère la longueur d'onde qui lui est destinée.

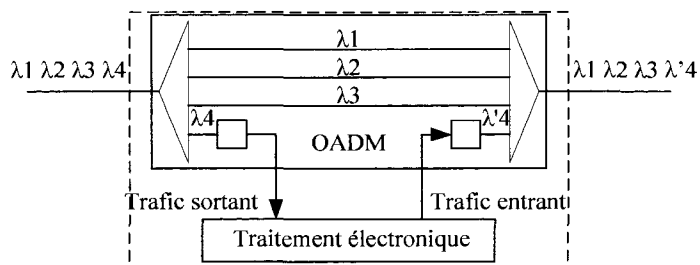


Figure 2.11: OADM

2.4.6 Commutateur (OXC : Optical cross connect)

Les commutateurs permettent d'effectuer des connections croisées qui consistent à affecter une certaine sortie à une entrée donnée. Ils peuvent être classés comme suit :

- commutateurs électriques qui sont précédés par des récepteurs afin de convertir le signal optique à un signal électrique et ils sont suivis par des transmetteurs pour envoyer le signal à travers la fibre optique et
- commutateurs optiques OXC qui permettent d'affecter une certaine sortie à une entrée donnée sans convertir le signal optique en un signal électrique.

Un exemple de commutateur OXC est illustré à la figure 2.12, où on peut effectuer des échanges entre les sorties et les entrées des multiplexeurs et démultiplexeur.

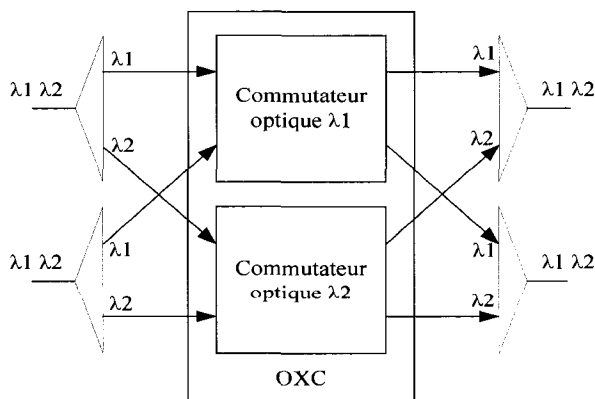


Figure 2.12: OXC

2.5 Exemples de défaillance des composants optiques

SONET permet de réaliser des remontées d'alarmes sur les différents équipements. Ces alarmes correspondent aux différents problèmes qui pourraient exister sur les équipements ou les liaisons. De ce fait, nous énoncerons dans cette partie quelques exemples de failles pour les différents composants du réseau optique [10].

2.5.1 Panne de la fibre optique

Comme mentionné dans le paragraphe de la fibre optique, il y a plusieurs paramètres qui contribuent à faire perdre la puissance au signal optique : l'effet de Rayleigh, l'effet de l'absorption par les ions OH et l'effet de l'absorption du verre, d'où l'introduction de la notion des fenêtres de transmission. Ces dernières diminuent les atténuations mais n'empêchent pas l'apparition d'interférences qui impliqueront une atténuation du signal reçu. En l'occurrence, il y aura un évanouissement de la puissance reçue et il peut y avoir une déformation du signal reçu, ce qui impliquera un certain taux d'erreur binaire.

La brisure de la fibre optique est un des problèmes qu'on peut aussi rencontrer et qui aura un impact sur la transmission des données.

2.5.2 Panne des transmetteurs

Les transmetteurs envoient des alarmes quand la température ou la puissance reçues sont au-delà de la normale. En effet, pour chaque variable (la température et la puissance), il y a deux rangs comme illustré à la figure 2.13. Le premier rang, noté par M_a , délimite les valeurs pour lesquelles le transmetteur travaille correctement. Le deuxième rang, noté par M_t , représente la limite de la marge supérieure. Si les caractéristiques des variables sont au-delà de ces marges, une alarme est envoyée à l'administrateur du réseau.

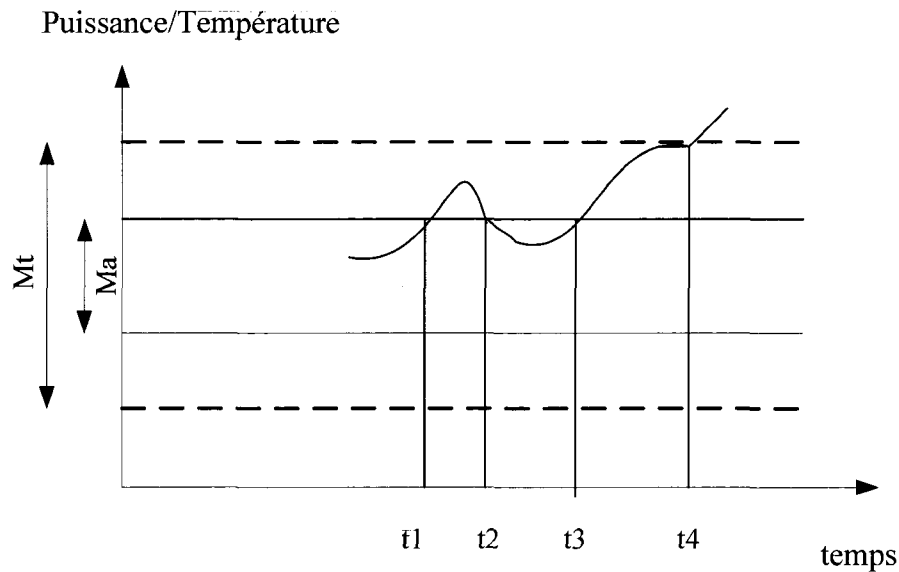


Figure 2.13 : La marge du transmetteur

Les transmetteurs peuvent aussi subir des pannes mécaniques et des pannes d'alimentation.

2.5.3 Panne des amplificateurs optiques

On peut recevoir des alarmes à partir des amplificateurs optiques dans le cas où :

- la puissance d'entrée est insuffisante pour amplifier le signal;
- le signal n'a pas été reçu dû à une panne du transmetteur et
- il y a une panne mécanique.

2.5.4 Panne des OADM

Les OADMs sont caractérisés par leurs bandes passantes et par leurs fréquences centrales. Cependant, la puissance du signal filtré à une fréquence f_0 , comme illustrée à la figure 2.14 peut se dégrader et subir une forte atténuation. (Voir le signal de sortie de la figure 2.14). En l'occurrence, les équipements qui le suivent (les récepteurs) ne

recevront pas de signal et en conséquence, ils enverront des alarmes pour signaler leurs pannes.

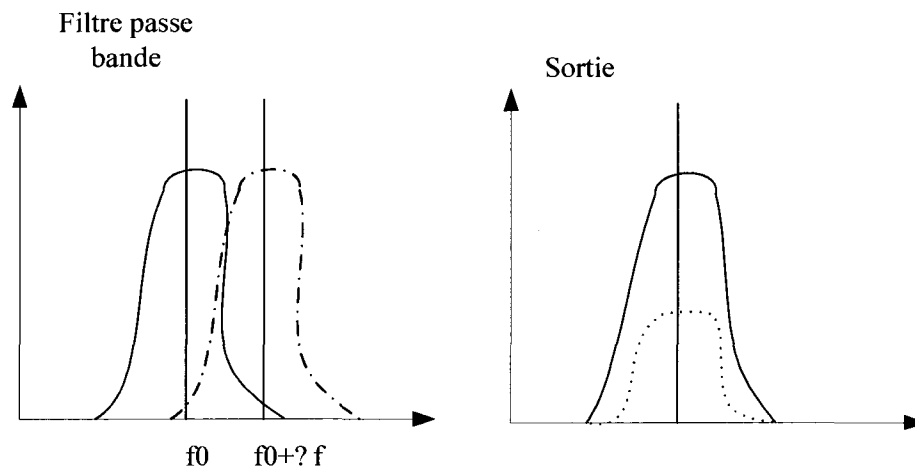


Figure 2.14 : Exemple de panne d'un OADM

2.5.5 Panne des commutateurs OXC

Les commutateurs optiques et électriques envoient des alarmes s'ils ont des problèmes internes. Un exemple de problème interne est l'impossibilité de connecter les ports d'entrées et de sorties. Ou l'initialisation (reset) du commutateur, due par exemple à un problème de la température.

Récapitulation

| Composants | Les causes des pannes |
|---------------|---|
| Fibre optique | Brisure Interférences des signaux dues à : <ul style="list-style-type: none"> • l'effet de Rayleigh; • l'effet de l'absorption par les ions OH et • l'effet de l'absorption du verre. |

| | |
|------------------|---|
| Transmetteur | Puissance insuffisante Température au-delà de la normale Panne mécaniques Pannes d'alimentation. |
| Amplificateur | Puissance d'entrée insuffisante Signal non reçu Panne mécanique |
| OADM | Atténuation du signal |
| commutateurs OXC | Problèmes internes Problème de température |

Nous avons cité dans cette section quelques problèmes que peuvent avoir les composants d'un réseau optique. Par ailleurs, en cas de panne d'un de ces derniers, des alarmes sont envoyées au gestionnaire du réseau et seront traitées dans la section 2.6.

2.6 Les alarmes SONET

Comme mentionné précédemment, SONET permet de réaliser des remontées d'alarmes sur les différents équipements. Ces alarmes correspondent aux différents problèmes mentionnés dans la section précédente qui pourraient exister dans les équipements ou les liaisons. En se basant sur ce qui a été décrit précédemment sur le

modèle d'architecture en couches du système SONET, nous présenterons dans cette section les principales alarmes SONET [17].

2.6.1 Définitions

LOS (Loss of signal)

Pour mesurer ou simuler les performances d'un système de transmission numérique, on utilise un estimateur de la probabilité erreur-bit appelé (BER). Ainsi, on détecte l'alarme LOS lorsqu'un signal a un taux d'erreur binaire (BER) plus grand que 10^{-3} . Il est détecté s'il n'y a pas de transition pour une période de 2.3 à 100 microsecondes. Ceci est dû à une rupture de la fibre optique, ou à une grande atténuation du signal ou à une panne d'un équipement.

Si l'état LOS persiste pour une période de 2.5 +/- 0.5 secondes, une *panne* LOS est déclarée. Par ailleurs, l'état LOS va être supprimé quand le système ne reçoit plus de LOS comme alarme durant une période de 10 +/- 0.5 secondes.

AIS (Alarm indication signal)

Cette alarme permet d'alerter les équipements du réseau qui suivent l'équipement qui a détecté la perte du signal (LOS). Elle est subdivisée en trois catégories :

- L-AIS Line alarm indication signal;
- P-AIS Path alarm indication signal et
- S-AIS Section alarm indication signal.

RDI (Remote defect indication)

Cette alarme permet d'alerter les équipements du réseau qui précèdent l'équipement qui a détecté la perte du signal (LOS). Elle est aussi subdivisée en trois catégories :

- L-RDI Line remote defect indication;
- P-RDI path remote defect indication et

S-RDI Section remote defect indication.

OOF (Out of frame)

On détecte cette alarme lorsqu'on reçoit quatre ou cinq trames successives ayant des séquences de tramage erronées. Le temps maximal afin de détecter OOF est 625 microsecondes. Par ailleurs, l'état OOF va être supprimé quand deux séquences de trames successives sont reçues correctement.

LOF (Loss of frame)

On détecte cette alarme lorsque la durée de l'état OOF est plus de 3 millisecondes. Lorsque l'état LOF persiste pour une période de 2.5 ± 0.5 secondes, une panne LOF est déclarée. En l'occurrence, l'état LOS se déclenche et ainsi l'état LOF disparaît.

2.6.2 Propagation des alarmes

Si un équipement reçoit une indication de perte de signal à la réception, il envoie un AIS à l'équipement qui le suit pour indiquer une défectuosité. Ce dernier va envoyer un RDI à l'équipement en amont pour lui signaler une défectuosité de l'équipement distant (figure 2.15).

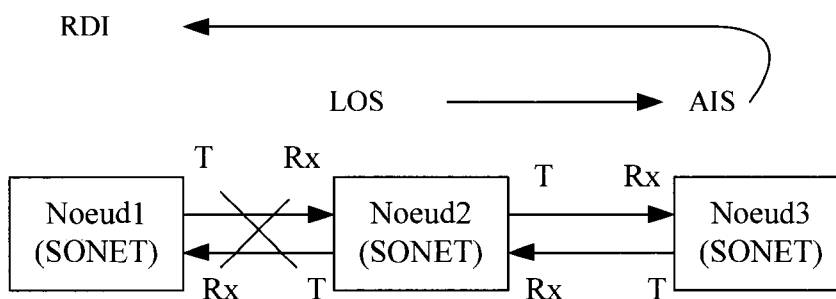


Figure 2.15 : Base de fonctionnement des alarmes SONET

En tenant compte du modèle d'architecture en couches du système SONET (Ligne, Conduit et section), nous nous intéresserons à présenter les alarmes liées aux deux premières couches, soient ligne et conduit.

Nous aurons ainsi ces différents scénarios d'alarmes en cas de réception d'une alarme de perte du signal (LOS).

Scénario 1 :

En cas de panne, on reçoit un LOS comme illustré à la figure 2.16.

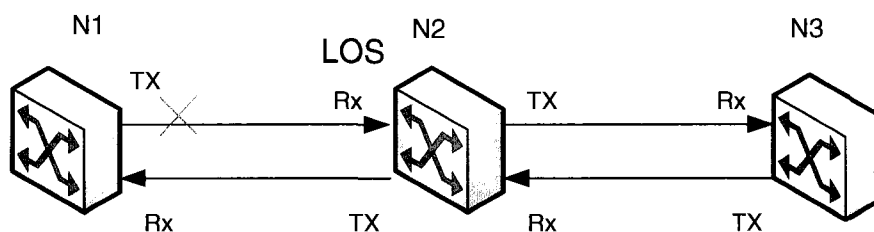


Figure 2.16 : Scénario1

Scénario 2 :

Si un port d'un nœud (N2) reçoit un LOS comme alarme, ce dernier enverra au nœud 'i+1' (qui le suit : N3) un P_AIS et L_AIS comme illustré à la figure 2.17.

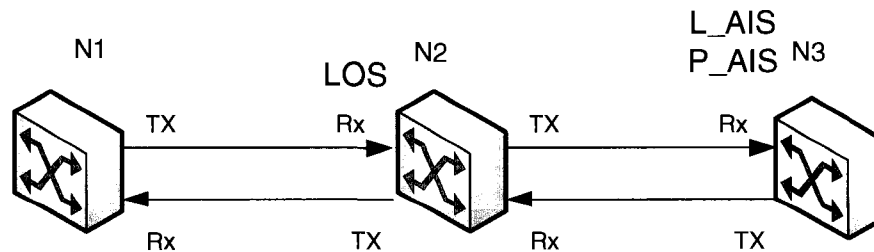


Figure 2.17 : Scénario 2

Scénario 3 :

Si un port d'un nœud (N2) reçoit un LOS comme alarme, ce dernier enverra au nœud 'i-1' (qui le précède : N1) un P_RDI et L_RDI comme illustré à la figure 2.18.

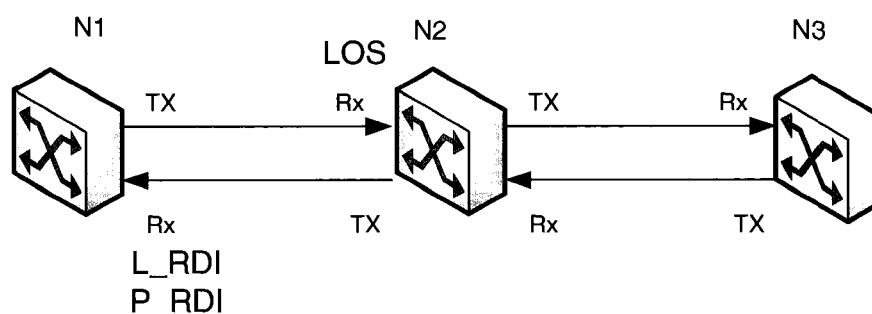


Figure 2.18 : Scénario 3

Scénario 4 :

Si un port d'un nœud (N2 dans notre cas) reçoit un P_AIS et L_AIS comme alarmes, ce dernier enverra au nœud 'i+1' (qui le suit : N3) un P_AIS comme illustré à la figure ci-dessous.

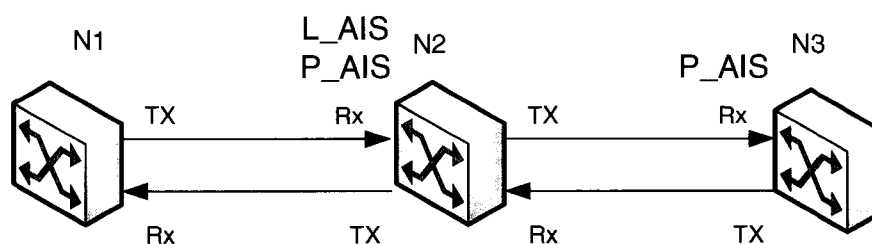


Figure 2.19 : Scénario 4

Scénario 5 :

Si un port d'un nœud (N2 dans notre cas) reçoit un P_RDI et L_RDI comme alarmes, ce dernier enverra au nœud 'i-1' (qui le précède: N1) un P_RDI comme illustré à la figure ci-dessous.

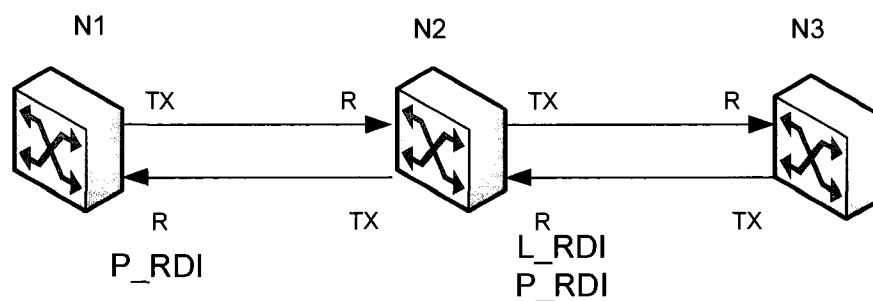


Figure 2.20 : Scénario 5

Scénario 6 :

Si un port d'un nœud (N2 dans notre cas) reçoit un P_AIS comme alarme, ce dernier enverra au nœud 'i+1' (qui le suit : N3) un P_AIS comme illustré à la figure 2.21.

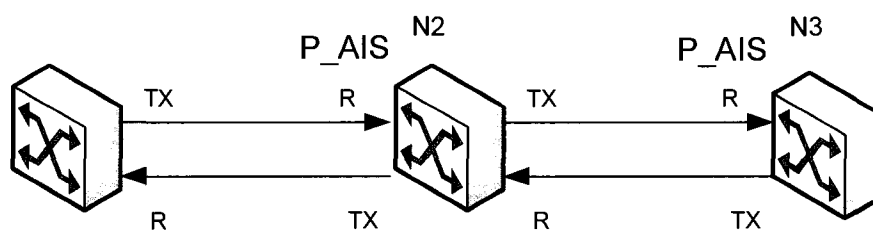


Figure 2.21 : Scénario 6

Scénario 7 :

Si un port d'un nœud (N2 dans notre cas) reçoit un P_RDI comme alarme, ce dernier enverra au nœud 'i-1' (qui le précède : N1) un P_RDI comme illustré à la figure 2.22.

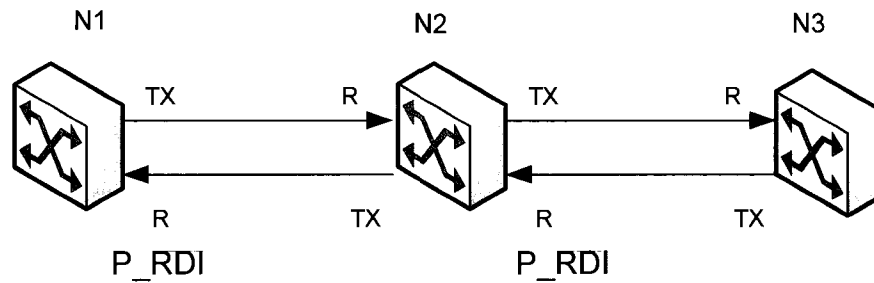


Figure 2.22 : Scénario 7

Récapitulation des scénarios :

Sachant qu'il y a eu une panne au niveau du lien reliant le nœud N3 à N4, la figure 2.23 illustre la propagation des alarmes pour un réseau contenant 6 nœuds ayant chacun des ports de transmissions et des ports de réception.

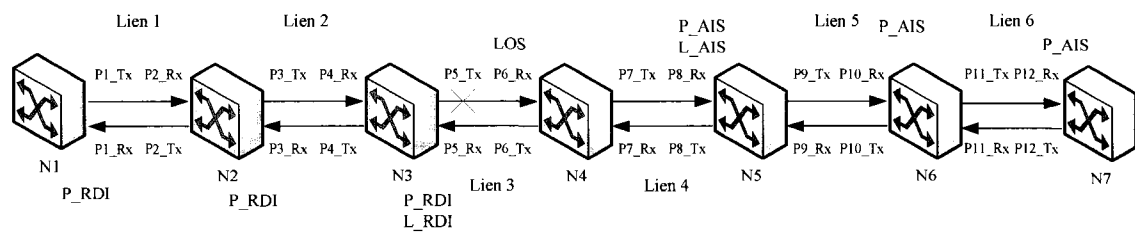


Figure 2.23 : Propagation des alarmes

2.6.3 Notion de délai dans les réseaux

2.6.3.1 Délai de propagation

Un signal se propage sur un support à une vitesse dite vitesse de propagation. En notant 'd' la longueur du canal, 'V' la vitesse de propagation en m/s ,
Le délai ou le temps de propagation T_p est donné par la formule suivante :

$$T_p = \frac{d}{V}.$$

Il faut noter que dans une fibre optique, $\frac{1}{V} = 5 \mu\text{s/km}$.

2.6.3.2 Délai de transmission

On appelle délai ou temps de transmission le temps nécessaire à l'émission ou à la réception d'une trame. Si on note L la longueur de la trame en bits, B le débit binaire en bit/s, le temps de transmission est donné par la formule suivante :

$$T_t = \frac{L}{B}.$$

2.6.3.3 Délai de traitement

On appelle délai de traitement le temps nécessaire que l'équipement consacre pour traiter l'information.

Dans le cas de transmissions dans les réseaux optiques, le délai de transmission et le temps de traitements sont négligeables par rapports au temps de propagation. De ce fait, le délai de propagations des alarmes se basera uniquement sur les temps de propagation. Supposons que le gestionnaire du réseau reçoit au nœud N1 et N6 des alarmes P_AIS et P_RDI comme illustrés à la figure 2.24. En se basant sur le principe de propagation des alarmes décrites précédemment, deux interprétations du lieu de la panne peuvent être déduites. Nous pouvons avoir soit une panne au niveau du port P3_Tx qui enverra un LOS au P4_Rx (figure 2.25) soit une panne au niveau du port P5_Tx qui enverra un LOS dans le P6_Rx (voir figure 2.26).

Cependant, pour détecter l'emplacement exact de la panne, nous introduirons la notion du temps de propagation. Ainsi, le gestionnaire du réseau recevra l'alarme et le temps de détection de cette dernière. Ceci est illustré à la figure 2.27 où on reçoit une alarme P_RDI à $t+4t_p$ et P_AIS à $t+3t_p$ avec :

- t : temps de la panne;
- t_p : temps de propagation de l'alarme d'un nœud à un autre.

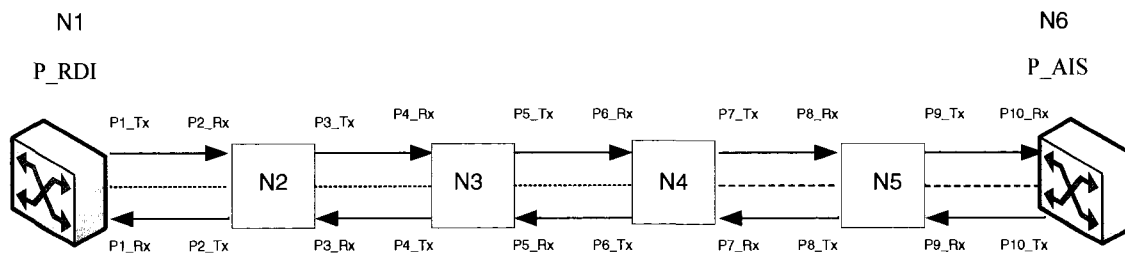


Figure 2.24 : Réception des alarmes P_AIS et P_RDI

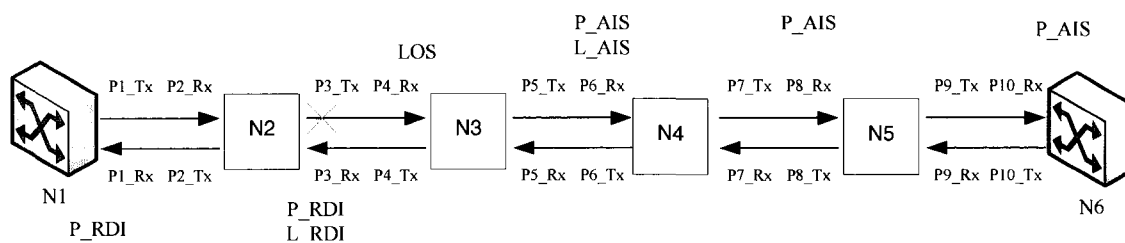


Figure 2.25 : Premier cas de propagation des alarmes

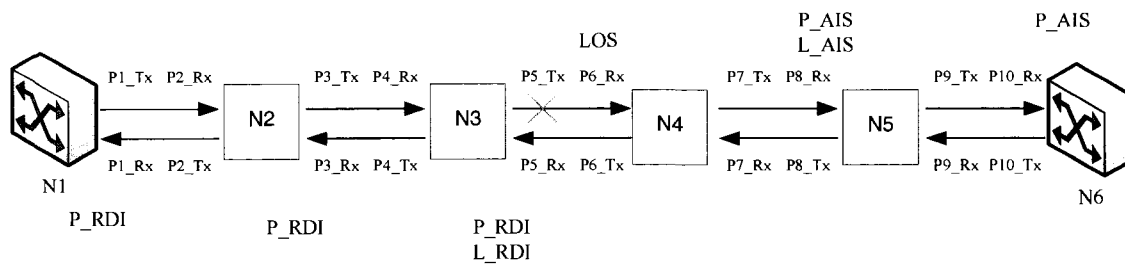


Figure 2.26 : Deuxième cas de propagation des alarmes

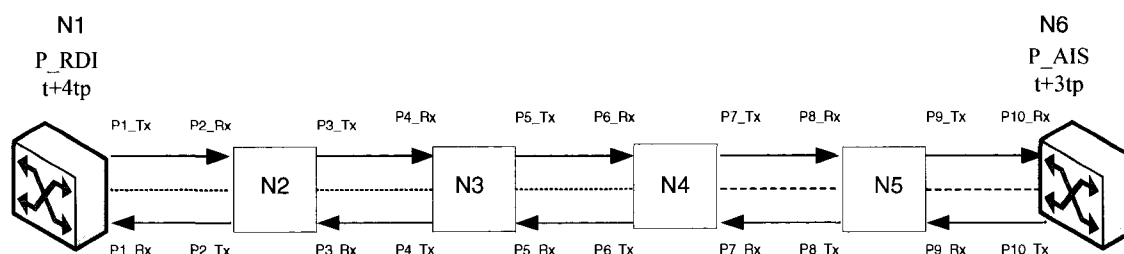


Figure 2.27 : Réception des alarmes P_AIS et P_RDI à un temps donné

En supposant que les distances entre les nœuds sont identiques (donc le temps de propagation de toutes les alarmes est identique), nous concluons que la panne est au niveau du P5_Tx et au temps t , en l'occurrence, nous aurons un LOS au P6_Rx.

En effet, le P6_Rx du nœud 4 recevra l'alarme LOS à $t+tp$. Ce dernier enverra un P_RDI et L_RDI au P5_Rx du nœud N3 à $t+2tp$. Le nœud N2 recevra ainsi au P3_Rx un P_RDI à $t+3tp$ et enfin, le nœud N1 recevra au port P1_Rx un P_RDI à $t+4tp$. Avec le même raisonnement, le P10_Rx recevra un P_AIS à $t+3tp$. L'interprétation des temps de propagation des alarmes est illustrée à la figure 2.28.

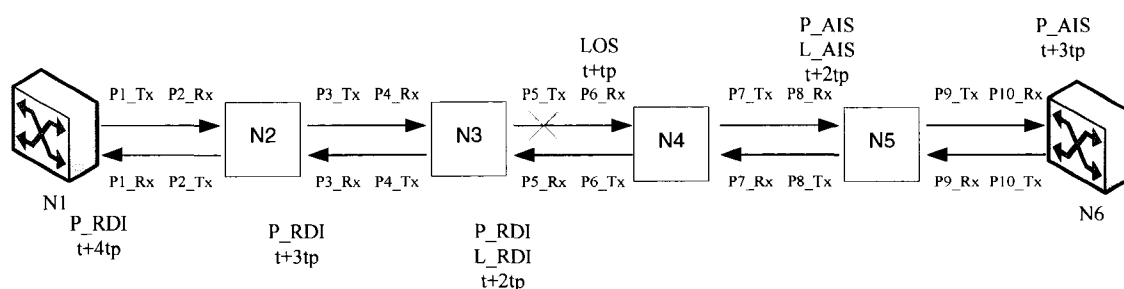


Figure 2.28 : Propagation des alarmes et temps de propagation

Plusieurs méthodes ont été développées dans la littérature afin de détecter la panne d'un équipement. Elles se basent sur la corrélation d'alarmes en permettant de filtrer, trier et regrouper ces dernières pour savoir quelles pannes ont eu lieu. Ces dernières seront décrites dans la section suivante.

2.7 Revue de littérature

Nous présenterons dans cette section quatre différentes approches qui ont été développées dans la littérature afin de localiser les pannes dans un réseau optique.

La première méthode que nous présenterons est celle de Mas [1]. Elle permet de localiser des pannes simples ou multiples. Son approche commence tout d'abord par classer les équipements en deux catégories : les composants passifs où nous n'observons pas les alarmes en cas de panne et les composants actifs qui affichent les alarmes. Ensuite, elle donne pour chaque élément du réseau son domaine, c'est-à-dire l'ensemble des éléments qui produisent des alarmes en cas de panne de cet élément. Par la suite, elle détermine l'ensemble des éléments qui sont directement liés aux alarmes reçues. Ainsi, les alarmes qui donnent une information redondante sont éliminées. Enfin, elle construit un arbre binaire dans lequel on trouve une correspondance entre les pannes et les composants.

Pour mieux comprendre cet algorithme, prenons l'exemple suivant où nous avons un réseau optique (figure 2.29) qui est représenté par trois chemins :

- chemin 1 : {P1, P2, P3, e3, P6, P7, e4};
- chemin 2 : {P4, P5, P3, e1, P6, P7, e4} et
- chemin 3: { P9, P8, P7, e2}.

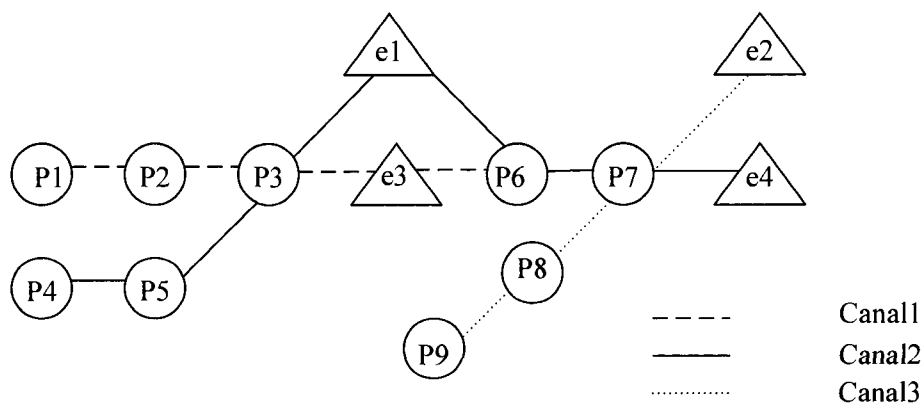


Figure 2.29 : Réseau optique

Sachant que les composants représentés par un 'p' représentent des éléments passifs et les composants représentés par un 'e' représentent les éléments actifs, son but est de déterminer les composants passifs qui ont déclenché les alarmes que nous observons dans les composants actifs. De ce fait, elle sépare les domaines des pannes de chaque chemin établi. C'est-à-dire, en cas de panne au niveau de p1 par exemple, nous observerons des alarmes dans les composants actifs qui appartiennent aux chemins passant par p1. Dans ce cas, il s'agit des composants 'e3' et 'e4'. Donc $HDomain\{p1\}=\{e3,e4\}$. En se basant sur ce principe, nous obtenons les domaines suivants :

| | |
|---------------------------|------------------------------|
| $HDomain\{p2\}=\{e3,e4\}$ | $HDomain\{p3\}=\{e1,e3,e4\}$ |
| $HDomain\{p4\}=\{e1,e4\}$ | $HDomain\{p5\}=\{e1,e4\}$ |
| $HDomain\{p6\}=\{e4\}$ | $HDomain\{p7\}=\{e2,e4\}$ |
| $HDomain\{p8\}=\{e2\}$ | $HDomain\{p9\}=\{e2\}$ |

Ensuite, elle regroupe les domaines identiques :

- $C1=HDomain\{p1\}=HDomain\{p2\}=\{e3,e4\}$
- $C2=HDomain\{p3\}=\{e1,e3,e4\}$
- $C3=HDomain\{p4\}=HDomain\{p5\}=\{e1\}$
- $C4=HDomain\{p6\}=\{e4\}$
- $C5=HDomain\{p7\}=\{e2,e4\}$
- $C6=HDomain\{p8\}=HDomain\{p9\}=\{e2\}$

Elle associe, par la suite, un vecteur binaire $\vec{g}_i = \text{Bin}(C_i)$. Dans ce cas, vu qu'on a quatre composants actifs e_1, e_2, e_3 et e_4 , \vec{g}_i sera composé de 4 chiffres binaires. Si nous prenons le cas de C_1 , nous avons :

$$\begin{aligned} \text{HDomain} = \{e_3, e_4\} &\Rightarrow e_1=0, e_2=0, e_3=1, e_4=1 \\ &\Rightarrow \vec{g}_1 = \text{Bin}(C_1) = (0011) \end{aligned}$$

En se basant sur ce principe, nous obtenons les vecteurs binaires suivants :

- $\vec{g}_1 = \text{Bin}(C_1) = (0011), \quad \vec{g}_2 = \text{Bin}(C_2) = (1011)$
- $\vec{g}_3 = \text{Bin}(C_3) = (1000), \quad \vec{g}_4 = \text{Bin}(C_4) = (0001)$
- $\vec{g}_5 = \text{Bin}(C_5) = (0101), \quad \vec{g}_6 = \text{Bin}(C_6) = (0100)$

Enfin elle représente les vecteurs \vec{g}_i dans un arbre binaire qui est illustré à la figure 2.30. Si par exemple nous obtenons la séquence 0011, nous savons que la panne provient du composant P_1 ou P_2 . En effet, en parcourant l'arbre binaire pour arriver à 0011, on trouve C_1 qui représente les composants P_1 et P_2 .

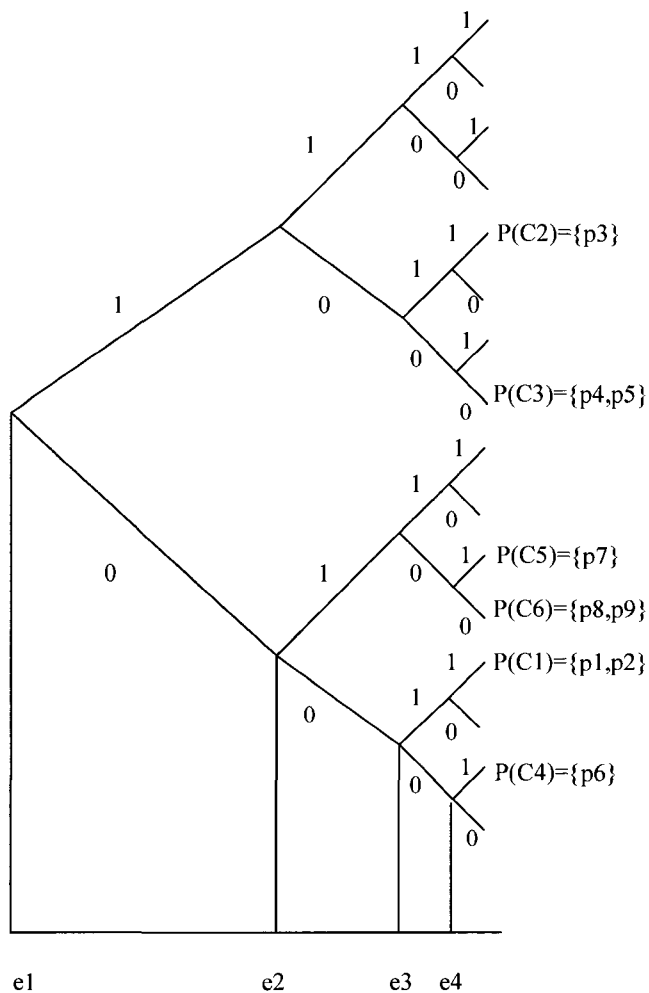


Figure 2.30 : Arbre binaire

On peut remplir tout l'arbre binaire en se basant sur le principe suivant :

- $\text{Bin}(C1) \vee \text{Bin}(C3) = \text{Bin}(C2)$
- $\text{Bin}(C1) \vee \text{Bin}(C5) = \text{Bin}(C11) = 0111$
- $\text{Bin}(C1) \vee \text{Bin}(C6) = \text{Bin}(C11)$
- $\text{Bin}(C2) \vee \text{Bin}(C5) = \text{Bin}(C8) = 1111$
- $\text{Bin}(C2) \vee \text{Bin}(C6) = \text{Bin}(C8)$
- $\text{Bin}(C3) \vee \text{Bin}(C5) = \text{Bin}(C10) = 1101$
- $\text{Bin}(C3) \vee \text{Bin}(C6) = \text{Bin}(C12) = 1100$

la figure 2.32, nous trouverons C1 dans les séquences 0001 et 0010. Cette séquence correspond alors à la panne du composant P2 ou P1.

Le même principe s'applique pour le cas où nous avons une fausse alarme. Le '0' devient un '1' et en se référant à la séquence C1 (0011), nous recevons soit 1011 ou 0111. Ainsi, si on parcourt l'arbre binaire de la figure 2.33, nous trouverons C1 dans les séquences 1011 et 0111. Cette séquence correspond alors à la panne du composant P2 ou P1.

Il se peut aussi que nous ayons une fausse alarme et une alarme perdue en même temps ($m1=1$ et $m2=1$). Ce cas est illustré à la figure 2.34.

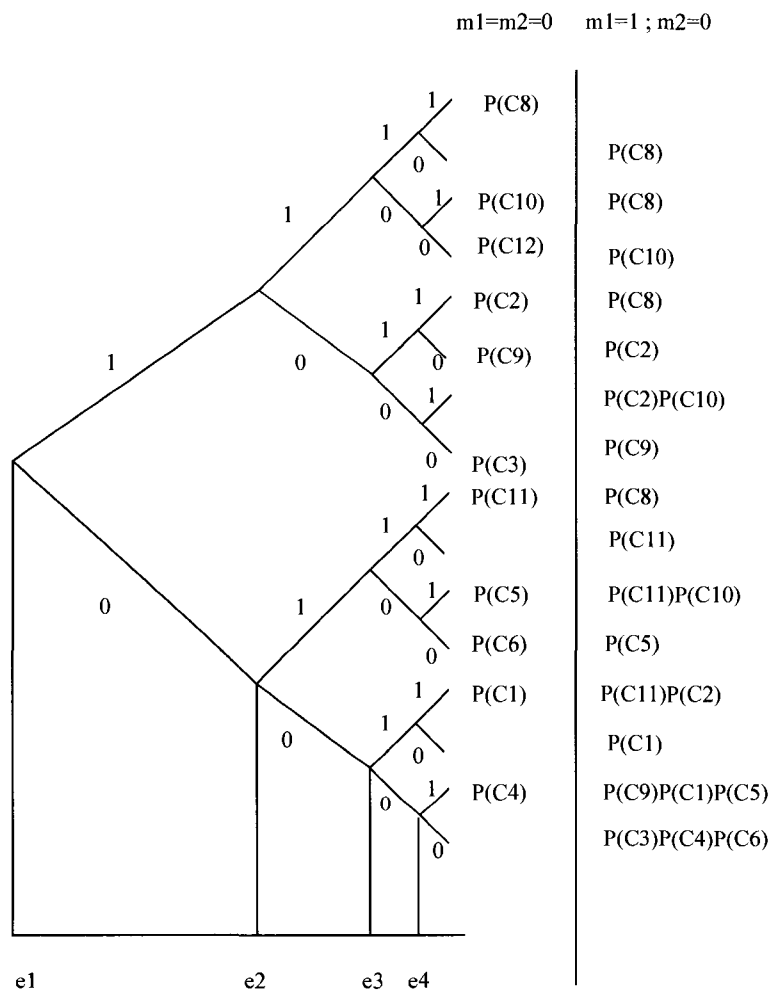
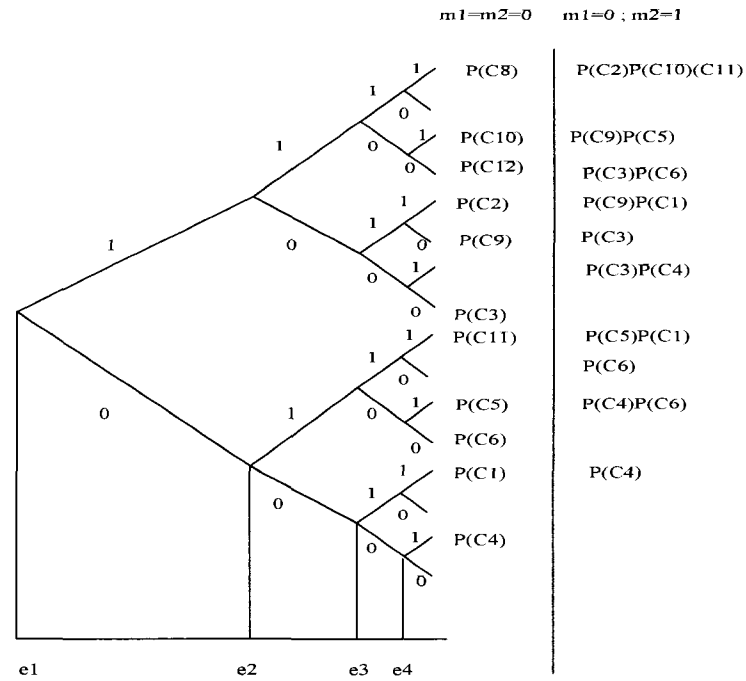
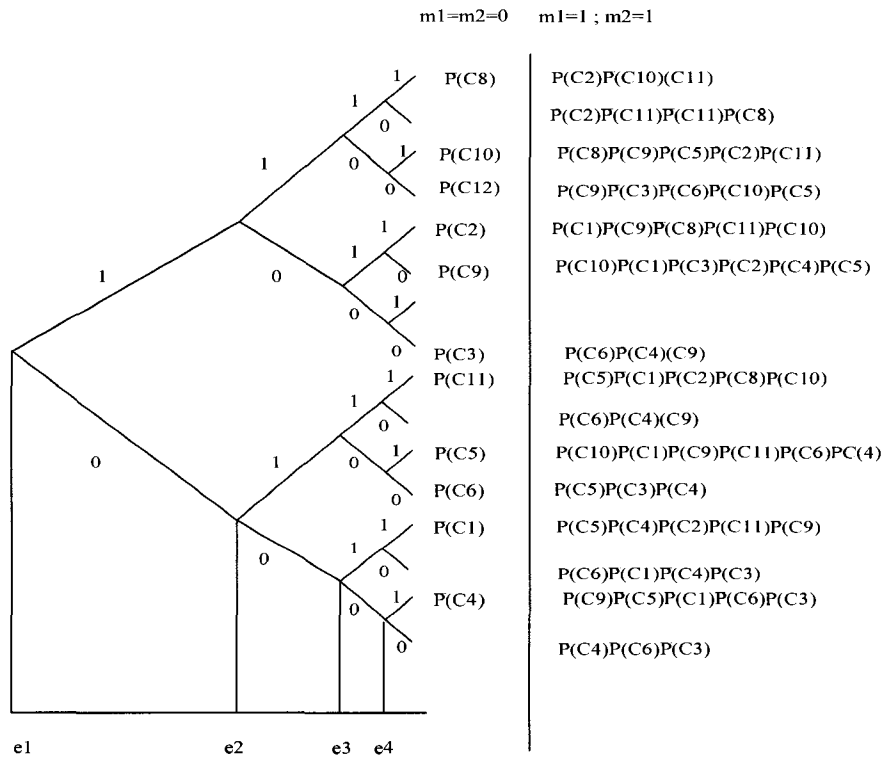


Figure 2.32 : Arbre binaire avec $m1=1, m2=0$

Figure 2.33 : Arbre binaire avec $m1=0, m2=1$ Figure 2.34 : Arbre binaire avec $m1=1, m2=1$

La méthode de Mas permet de localiser les pannes des composants du réseau optique en présence de fausses alarmes et d'alarmes perdues mais si nous prenons le cas des réseaux à grande capacité qui se basent sur la technologie WDM, une panne peut déclencher des centaines et même des milliers d'alarmes. La méthode de Mas nous permet de filtrer les domaines des alarmes sans empêcher que le nombre de possibilité de panne des composants reste important.

La deuxième méthode que nous présenterons est celle de Stanic [2]. Elle consiste à placer des microcontrôleurs qui permettent de détecter les pannes. Ainsi, son but consiste à optimiser l'emplacement de ces derniers. Pour ce faire, il fait une correspondance entre les composants du réseau et les différents microcontrôleurs qui affichent des alarmes en cas de panne de l'un de ces composants. Par la suite, les microcontrôleurs qui donnent une information redondante sont éliminés.

Prenons l'exemple suivant (figure 2.35) où nous voulons placer des microcontrôleurs. Nous avons trois longueurs d'onde : LP1, LP2 et LP3 qui sont illustrées à la figure 2.36 avec :

- LP1 : noeud1 \rightarrow noeud2 \rightarrow noeud3;
- LP2 : noeud1 \rightarrow noeud4 \rightarrow noeud2 \rightarrow noeud5 \rightarrow noeud3 et
- LP3 : noeud6 \rightarrow noeud4 \rightarrow noeud2 \rightarrow noeud5 \rightarrow noeud8.

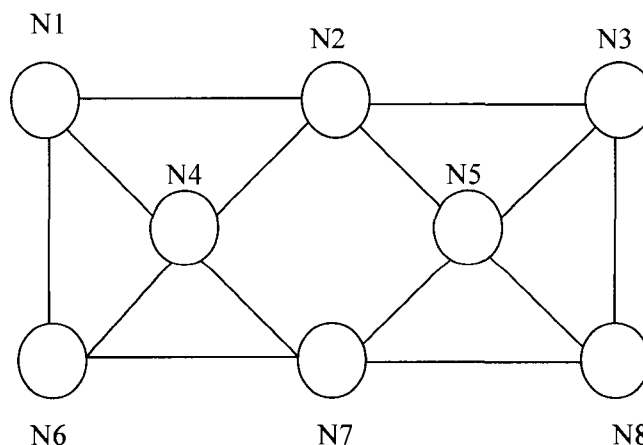


Figure 2.35 : Réseau optique composé par 8 nœuds

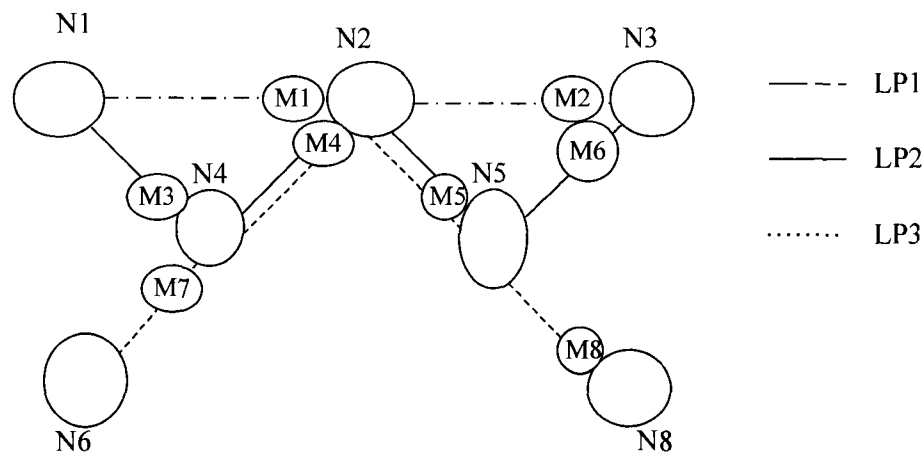


Figure 2.36 : Emplacement des microcontrôleurs au niveau des nœuds

L'algorithme commence tout d'abord par placer les microcontrôleurs dans chaque liaison (soit M_1, M_2, \dots, M_i). Cependant, s'il y a une panne au nœud 1 (notée par FN1 dans le tableau 2.1), nous allons observer des alarmes dans les microcontrôleurs appartenant aux longueurs d'onde passant par ce nœud, soit LP1 et LP2. De ce fait, nous observerons des alarmes dans les microcontrôleurs suivants : M1, M2, M3, M4, M5 et M6. Ainsi, une matrice des alarmes est construite pour tous les autres scénarios de pannes. Cette dernière est illustrée au tableau 2.1.

Tableau 2.1 : Matrice des alarmes

| Pannes | M1 | M2 | M3 | M4 | M5 | M6 | M7 | M8 |
|--------|----|----|----|----|----|----|----|----|
| FN1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| FN2 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| FN3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| FN4 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| FN5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| FN6 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| FN7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| FN8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

La seconde étape de l'algorithme correspond à simplifier la table des matrices. Cette simplification consiste à regrouper les lignes identiques de la matrice en une seule ligne et à enlever les lignes ayant des zéros partout. Nous obtenons ainsi la matrice suivante :

Tableau 2.2 : Matrice des alarmes simplifiée

| Pannes | M1 | M2 | M3 | M4 | M5 | M6 | M7 | M8 |
|--------|----|----|----|----|----|----|----|----|
| FN1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| FN2 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| FN4 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| FN5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| FN6 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 |

La dernière étape de l'algorithme consiste à enlever les microcontrôleurs redondants.

Ainsi :

- M1 affiche l'alarme en cas de la panne du nœud 1;
- M2 affiche les alarmes du nœud 1 et du nœud 2 et
- M3 affiche l'alarme en cas de la panne du nœud 1.

Nous enlevons M3 et M1 vu qu'ils nous affichent l'alarme du nœud 1 alors que cette dernière est déjà donnée par M2.

Pour M4, il rajoute de l'information concernant les pannes des nœuds 4 et 6. Donc nous la gardons dans la matrice et ainsi de suite. Nous obtenons ainsi la matrice optimale suivante :

Tableau 2.3 : Matrice finale des alarmes

| Pannes | M2 | M4 | M6 |
|--------|----|----|----|
| FN1 | 1 | 1 | 1 |
| FN2 | 1 | 0 | 1 |
| FN4 | 0 | 1 | 1 |
| FN5 | 0 | 0 | 1 |
| FN6 | 0 | 1 | 0 |

Ainsi, le nombre des contrôleurs est maintenant de 3 au lieu de 8, soit M2, M4 et M6.

L'inconvénient de cette méthode est le temps de calcul afin de placer les microcontrôleurs dans le réseau. En effet, si nous prenons le cas des réseaux WDM qui sont des réseaux à grande capacité, une panne peut déclencher des centaines et même des milliers d'alarmes. Ceci aura un fort impact sur le temps de calcul de l'emplacement des microcontrôleurs.

La troisième méthode que nous présenterons est celle de Katzela et Schwartz [3]. Elle se base sur les probabilités de pannes des nœuds et des liens du réseau optique. Leur approche consiste tout d'abord à transformer un réseau donné G en un graphe de dépendance. Ils assignent par la suite une probabilité p_{ij} qui représente la dépendance entre les nœuds et les liens et ils affectent une probabilité p_i à chaque nœud qui représente la probabilité qu'un nœud tombe en panne indépendamment de l'état des autres nœuds. Ensuite, l'algorithme consiste à rassembler les nœuds ayant la plus grande valeur de la probabilité de dépendance.

Prenons l'exemple suivant (figure (2.37 a)) où nous avons un réseau de 3 nœuds A, B et C et quatre liens (L1, L2, L3 et L4). La figure (2.37 b) illustre bien le passage d'un graphe donné à graphe de dépendance.

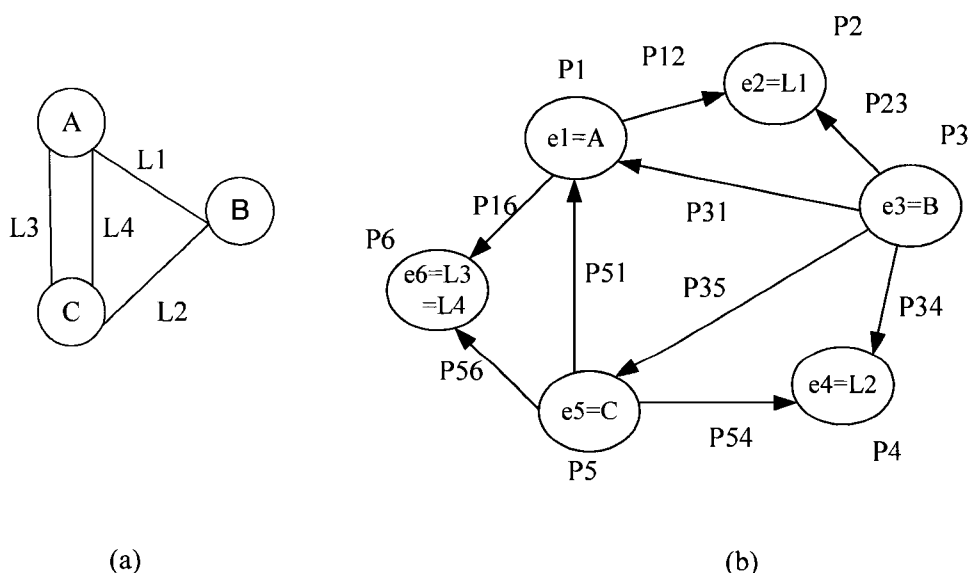


Figure 2.37 : Réseau 'a' et son graphe de dépendance 'b'

Une fois que le graphe de dépendance est construit, l'algorithme consiste à rassembler, les nœuds ayant la plus grande valeur de probabilité de dépendance et les remplacer par un nouveau nœud k ayant une probabilité P_k [3] avec :

$$P_k = P_i + P_j * P_{ji} + P_j + P_i * P_{ij} \quad (2.1)$$

Pour mieux comprendre cet algorithme, supposons que nous ayons le graphe de dépendance suivant :

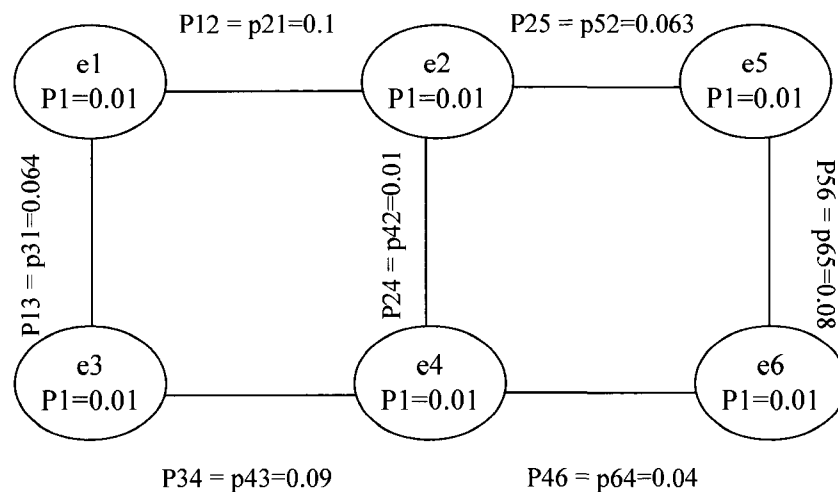


Figure 2.38 : Graphe de dépendance

Nous supposons que chaque nœud a une probabilité de panne de 0.01. Comme les nœuds $e1$ et $e2$ ont la plus grande valeur de dépendance ($p_{12} = 0.1$), nous les regroupons dans un nouveau nœud. La nouvelle probabilité devient égale à 0.022 en appliquant la formule donnée précédemment (2.1). En l'occurrence, nous obtenons les résultats qui sont illustrés à l'étape 2 de la figure 2.39. Nous continuons ainsi de regrouper les nœuds jusqu'à ce que nous arrivions à un seul nœud qui regroupe tous les autres nœuds. (Voir étape 6 de la figure 2.39).

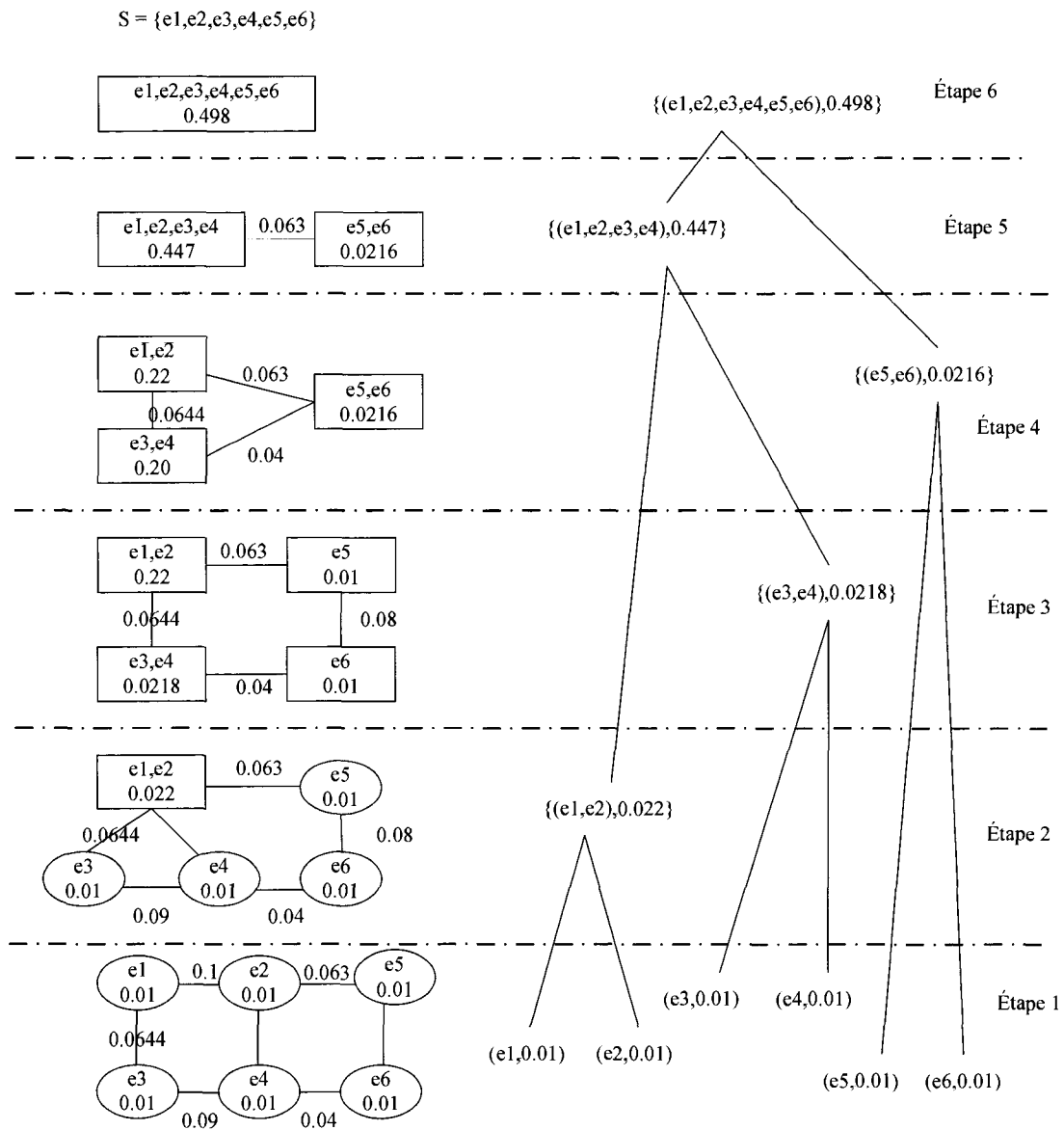


Figure 2.39 : Algorithme de Katzela

La seconde phase de l'algorithme est une phase de sélection. Elle consiste à parcourir les nœuds que nous avons rassemblés et de chercher les branches ayant les plus grande probabilités et ainsi de suite, jusqu'à se rendre au dernier nœud. Ils déduisent alors qu'il y a une forte probabilité que la panne est au niveau de $e1$ [3].

L'inconvénient de la méthode de Katzela et Schwartz est le calcul de probabilité des pannes des différents équipements du réseau ainsi que la probabilité de propagation puisqu'il s'avère que c'est difficile d'attribuer une probabilité de panne à un composant donné.

La dernière méthode que nous présenterons est celle d'Aboelela et de Douligeris [4]. Cette dernière se base sur la méthode de Katzela et Schwartz. Elle consiste à transformer tout d'abord un réseau donné G en un graphe de dépendance. Ils assignent par la suite une probabilité p_{ij} qui représente la dépendance entre les nœuds (e_i et e_j) et ils affectent une probabilité p_i à chaque nœud qui représente la probabilité qu'un nœud tombe en panne indépendamment de l'état des autres nœuds. Ensuite, ils se basent sur la simplification de Karnaugh [22] afin de filtrer les domaines des alarmes.

Pour mieux comprendre leurs algorithmes, prenons l'exemple du réseau de la figure 2.37 a. La première phase de l'algorithme consiste à construire le graphe de dépendance qui est illustré à la figure 2.37b. La seconde phase consiste à utiliser la méthode de simplification de Karnaugh pour un ensemble d'alarmes reçues.

Supposons que nous recevons trois alarmes (figure 2.40) dont les domaines sont :

- $D(a1) = \{e1, e4\}$;
- $D(a2) = \{e2, e3\}$ et
- $D(a3) = \{e3, e5\}$.

Soit :

- $x1 = L1$;
- $x2 = L2$;
- $x3 = x4 = L3$ et
- $x4 = L4$.

$$\Rightarrow x3 = x4$$

Nous déduisons que les pannes notées par f qui ont propagé les alarmes $a1$, $a2$ et $a3$ sont:

- $f(a1) = (x1 \wedge x3) \vee x2$;
- $f(a2) = x1 \vee (x1 \wedge x2)$;
- $f(a3) = (x1 \wedge x2) \vee (x2 \wedge x3)$.

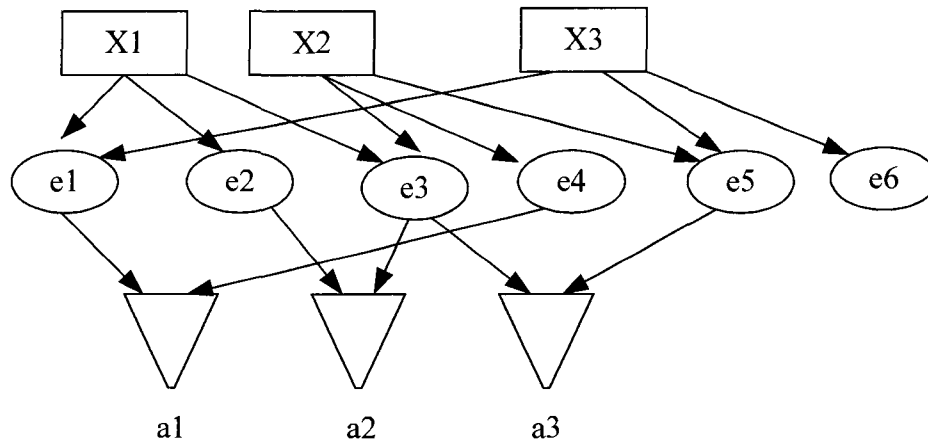


Figure 2.40 : Correspondance entre les alarmes et leurs domaines

L'objectif est de simplifier l'expression de $F(A)$ qui est donnée par la formule suivante :

$$F(A) = f(a1) + f(a2) + f(a3) \quad (2.2)$$

Pour ce faire, nous simplifierons $f(a1)$, $f(a2)$ et $f(a3)$ à l'aide des tables de Karnaugh. Si nous prenons l'exemple de $f(a1) = (x1 \wedge x3) \vee x2$, nous obtenons la matrice suivante (tableau 2.4) :

Tableau 2.4 : $f(a1) = (x1 \wedge x3) \vee x2$

| $x1x2/x3x4$ | 00 | 01 | 11 | 10 |
|-------------|----|----|----|----|
| 00 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 01 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 11 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 10 | 0 | 0 | 1 | 1 |

En suivant le même principe pour $f(a2)$ et $f(a3)$, nous obtenons les tables qui sont illustrées à la figure 2.41.

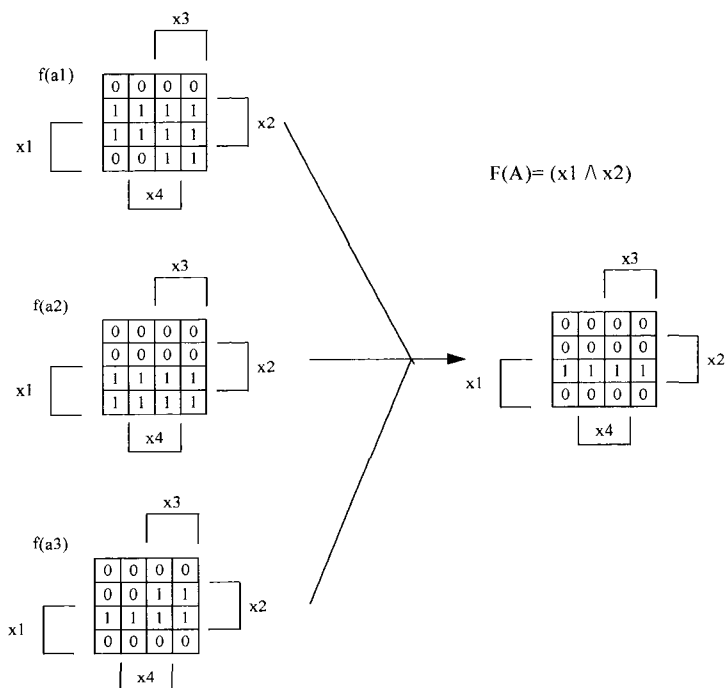


Figure 2.41 : Corrélation des alarmes en utilisant la méthode de Karnaugh

Ainsi, nous obtenons :

$$F(A) = (x1 \wedge x2)$$

Donc les sources des alarmes sont soit $x1$ soit $x2$.

La méthode de d'Aboelela et de Douligeris est efficace pour les réseaux de petites tailles mais dans les réseaux de grandes tailles, on peut recevoir des milliers d'alarmes, ce qui complique la corrélation des alarmes en utilisant la méthode de simplification de Karnaugh.

2.8 Conclusion

Nous avons défini dans ce chapitre l'importance de l'utilisation des réseaux optiques. Nous avons aussi déterminé les différents composants de ce dernier et des exemples de défaillance de ces éléments ont été présentés. Nous avons vu que ces pannes déclencheront des alarmes qui vont être reçues par le gestionnaire du réseau. Nous avons défini les types ainsi que la méthode de propagation de ces alarmes. Différentes techniques, qui ont été présentées dans la littérature afin de détecter les pannes dans un réseau optique, ont été aussi définies dans ce chapitre. Cependant, nous traiterons dans le chapitre suivant notre propre méthodologie qui nous permettra de détecter les pannes peu importe la taille des réseaux.

Chapitre 3 : Méthode proposée

La notion de contrainte est très présente dans notre vie quotidienne. Qu'il s'agisse d'affecter des tâches à des employés tout en respectant leurs domaines de spécialisation, d'affecter des stages à des étudiants en respectant leurs choix ou encore de ranger des pièces de différentes taille et de forme dans la même boîte. Ainsi, la notion de 'problèmes de satisfaction de contraintes' (CSP) désigne l'ensemble de ces problèmes, définis par des contraintes, dans lesquels une valeur doit être assignée à chaque variable de ces contraintes afin de trouver une solution satisfaisante. Ces contraintes définissent alors les relations entre les divers éléments du problème.

Les algorithmes ont été développés spécifiquement pour résoudre ces problèmes, appelés des solveurs, définissent ainsi un nouveau modèle de programmation appelé *la programmation par contraintes (PPC)*. Ces solveurs de contraintes se basent sur la propagation de contraintes et le filtrage des domaines. L'utilisateur n'a pas besoin de programmer la procédure de recherche. Il n'a besoin que de modéliser le problème sous forme de contraintes qui servent à guider et explorer l'espace des domaines de solutions.

La méthode que nous utiliserons pour traiter la gestion des alarmes se basera sur la programmation par contraintes. Nous avons choisi cette méthode de résolution puisqu'il y a un rapprochement naturel entre la propagation des contraintes en PPC et la propagation des alarmes. En plus, l'intérêt de cette méthode est la résolution de problèmes d'optimisation combinatoire dans le domaine de l'aide à la décision où elle a largement fait ses preuves.

Nous présenterons ainsi dans ce chapitre les différents concepts de la programmation par contraintes. Nous décrirons par la suite deux modèles qui consistent tout d'abord à définir le réseau optique. Dans la deuxième étape, nous introduirons des pannes et nous générerons des alarmes en nous basant sur les alarmes SONET. Ces dernières seront générées à partir d'un logiciel programmé en C++. Par la suite, nous définirons des contraintes à partir de l'état des équipements et les alarmes observées.

Nous utiliserons ensuite le logiciel OPL afin de résoudre ces contraintes et proposerons ainsi des diagnostics de pannes tout en tenant compte de l'aspect temporel des alarmes.

3.1 Programmation par contraintes

3.1.1 Domaine de contraintes

Une contrainte est une relation entre une ou plusieurs variables [11]. Le domaine de contraintes est représenté par deux éléments. Nous trouvons tout d'abord le domaine D des valeurs que peuvent prendre les variables et ensuite la signature Σ , représentant l'ensemble des symboles de fonction et prédicats disponibles. Ainsi, un domaine de contraintes linéaires sur les réels aura une signature $\Sigma = \{+, =, <, \leq, 0, 1\}$ et le domaine des variables sera l'ensemble des nombres réels $D=R$.

3.1.2 Définition d'un CSP

Un CSP (Problèmes de Satisfaction de Contraintes) est un problème modélisé sous la forme d'un ensemble de contraintes posées sur des variables. Il est défini par un triplet (X, D, C) tel que $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ est l'ensemble des variables représentant les inconnues du problème. Chacune de ses variables admet différentes valeurs possibles provenant d'un domaine fini $\{D(x_1), D(x_2), \dots, D(x_n)\}$. Enfin, l'ensemble $C = \{c_1, c_2, \dots, c_m\}$ représente l'ensemble des contraintes auxquelles doivent être soumises les variables. Une solution à un tel modèle est un ensemble de valeurs $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ tel que lorsque $X = V$ ($x_1 = v_1, x_2 = v_2, \dots, x_n = v_n$), les contraintes de C sont toutes satisfaites. Considérons l'exemple suivant où nous voulons résoudre le CSP (X, D, C) tel que :

- $X = \{a, b, c, d\}$;
- $D(a) = D(b) = D(c) = D(d) = \{0, 1\}$ et
- $C = \{a \neq b, c \neq d, a + c < b\}$.

Ce modèle comporte quatre variables a, b, c, d . Chacune peut prendre la valeur 0 ou 1 tout en respectant les contraintes suivantes : a doit être différente de b ; c doit être différente de d et la somme de a et c doit être inférieure à b . La solution de ce CSP est $V = \{0, 1, 0, 1\}$.

3.1.2 Solveur : propagation et filtrage

Dans le cas de résolution sur domaines finis, il est en théorie possible d'énumérer toutes les possibilités et vérifier si elles violent ou non les contraintes. Cependant, cela serait extrêmement lourd en calculs. D'où la notion de filtrage. C'est un processus qui enlève les valeurs non valides des domaines de variables. Considérons l'exemple suivant où nous avons deux variables x et y ayant comme domaines $D(x) = \{0, 1, 2, 3\}$ et $D(y) = \{1, 2, 3\}$. Si nous avons la contrainte $x < y$, le filtrage élimine la valeur 3 du domaine de x . En outre, si la variable x est impliquée dans une deuxième contrainte $z = x + y$ où $D(z) = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$, alors l'élimination de la valeur 3 fait en sorte que z ne peut pas avoir la valeur 6. Le filtrage de x s'est ainsi propagé vers z . Ainsi, la propagation est le mode de communication entre les contraintes et le domaine des variables. Il existe quatre caractérisations générales du niveau de cohérence : la cohérence de nœud qui ne considère que les contraintes à une seule variable, la cohérence d'arc pour les contraintes binaires (impliquant deux variables), la cohérence de bornes pour les contraintes arithmétiques et la cohérence de domaine pour les contraintes impliquant plus de deux variables.

3.1.2.1 Cohérence de nœud

Elle consiste à éliminer les valeurs non cohérentes pour toutes les contraintes à une seule variable. Par exemple, une variable x ayant comme domaine $D(x) = \{1, 2, 3, 4, 5\}$ soumise à une contrainte $x > 2$ aura un domaine réduit à $D(x) = \{3, 4, 5\}$.

3.1.2.2 Cohérence d'arc

Elle s'applique dans le cas de contraintes binaires. Ainsi, une contrainte binaire peut être représentée par un arc reliant les deux variables impliquées, d'où l'emploi du mot arc. Le concept consiste à vérifier pour chaque valeur v_i du domaine d'une variable s'il existe une valeur *support* v dans le domaine de l'autre variable permettant de satisfaire la contrainte. Toutes les valeurs n'ayant pas de support seront éliminées. Si nous prenons l'exemple précédent où nous avons deux variables x et y soumises à la contrainte $x < y$ ayant les domaines $D(x) = \{0, 1, 2, 3\}$ et $D(y) = \{1, 2, 3\}$, $D(y)$ est cohérent au sens des arcs puisque la valeur $0 \in D(x)$ est plus petite que toutes les valeurs de $D(y)$. Par contre, la valeur 3 de $D(x)$ ne satisfait pas la contrainte $x < y$ puisqu'il n'y a aucune valeur dans le domaine de y qui soit plus grande. En l'occurrence, cette valeur doit être filtrée du $D(x)$. Nous aurions ainsi $D(x) = \{0, 1, 2\}$ et $D(y) = \{1, 2, 3\}$.

3.1.2.3 Cohérence de bornes

Lorsque les domaines des variables sont trop grands, l'énumération de toutes les possibilités devient trop lourde. De ce fait, on ne travaille que sur les bornes inférieures et supérieures du domaine. Ainsi, pour chaque variable x , il existe une valeur réelle r_i pour chacune des autres variables x_i avec $\min(D(x_i)) \leq r_i \leq \max(D(x_i))$ qui satisfait la contrainte.

Considérons l'exemple $x = y + z$. En se basant sur la cohérence de bornes, nous aurons :

$$\begin{aligned} x &\geq \min(D(y)) + \min(D(z)), & x &\leq \max(D(y)) + \max(D(z)), \\ y &\geq \min(D(x)) - \max(D(z)), & y &\leq \max(D(x)) - \min(D(z)), \\ z &\geq \min(D(x)) - \max(D(y)), & z &\leq \max(D(x)) - \min(D(y)). \end{aligned}$$

3.1.2.4 Cohérence de domaines

Pour les contraintes de plus de deux variables, nous utilisons la cohérence de domaines qui est une généralisation de la cohérence d'arc à un nombre arbitraire de variables. Malheureusement, déterminer la cohérence d'arc est NP-difficile. En effet, généralement, la complexité des algorithmes de filtrage est exponentielle avec le nombre de variables impliquées dans la contrainte. Il faut recourir à la cohérence de bornes pour les contraintes de nature arithmétique ou transformer la contrainte en des contraintes binaires et appliquer la cohérence d'arc.

Il est avantageux d'utiliser la cohérence de domaine pour les contraintes globales (impliquant plusieurs variables en même temps) telles *que* [19] *alldifferent*, *gcc*, *regular*, etc. En effet, il existe des algorithmes efficaces (polynomiaux) qui leur permettent d'atteindre la cohérence de domaine.

La recherche de solutions en programmation par contraintes est une recherche arborescente. Ainsi, il faut choisir la stratégie de recherche : l'ordre selon lequel les variables seront affectées et l'ordre dans lequel les variables seront choisies. Par ailleurs, la procédure de recherche devient beaucoup plus difficile dans le cas des problèmes complexes de grande taille. En l'occurrence, la stratégie de recherche doit être adaptée selon le problème. Plusieurs méthodes ont été proposées pour l'ordre de sélection des variables et pour l'ordre de sélection des valeurs. Veuillez vous référer à [19] pour plus de détails sur ces méthodes.

En se basant sur la programmation par contraintes, nous décrirons dans les sections suivantes notre procédure afin de traiter la gestion des alarmes.

3.2 Les données

Pour le modèle de notre réseau, nous avons comme données une matrice qui nous indique les liens entre les nœuds ainsi que les distances correspondantes. Si nous avons la matrice qui est illustrée au tableau 3.1, nous obtenons le réseau illustré à la figure 3.1.

Tableau 3.1 : Topologie physique : ensemble des liens

| Noeud 1 | Noeud 2 | Distance (Km) |
|---------|---------|---------------|
| 1 | 2 | 10 |
| 2 | 3 | 12 |
| 2 | 13 | 13 |
| 3 | 4 | 15 |
| 3 | 14 | 16 |
| 4 | 5 | 17 |
| 4 | 8 | 18 |
| 5 | 6 | 1 |
| 5 | 9 | 2 |
| 7 | 8 | 3 |
| 9 | 10 | 4 |
| 10 | 11 | 5 |
| 12 | 13 | 6 |
| 14 | 15 | 2 |

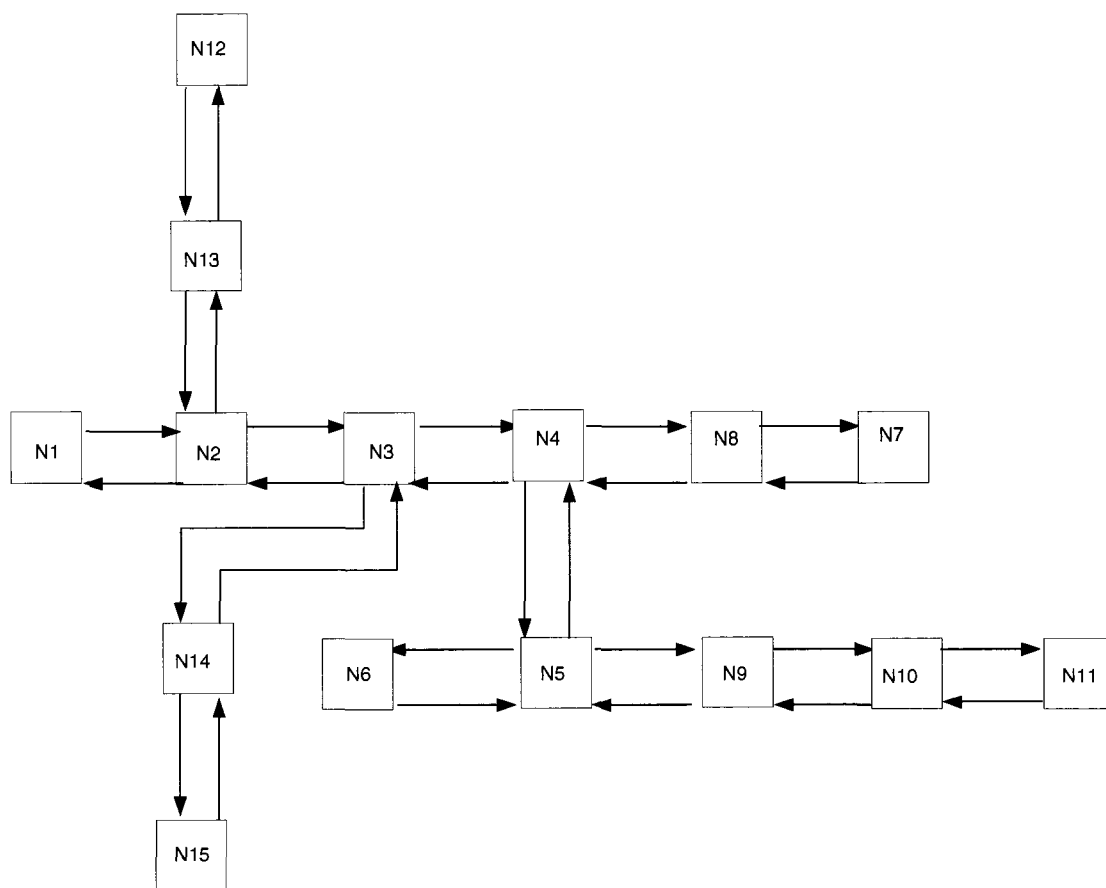


Figure 3.1 : Réseau obtenu à partir des données du tableau 3.1

Les liens du réseau obtenu (figure 3.1) seront branchés aux nœuds grâce à des ports. Étant donné que les liens sont bidirectionnels, nous caractériserons les nœuds par des ports de transmission et des ports de réception. Les ports sont reliés aux nœuds grâce à des cartes. Des chemins optiques seront définis à partir de ce réseau. L'exemple de la figure 3.2 illustre le cas où nous avons trois chemins optiques ayant N1, N12 et N7 comme nœuds de source et N6, N15 et N11 comme nœuds de destination.

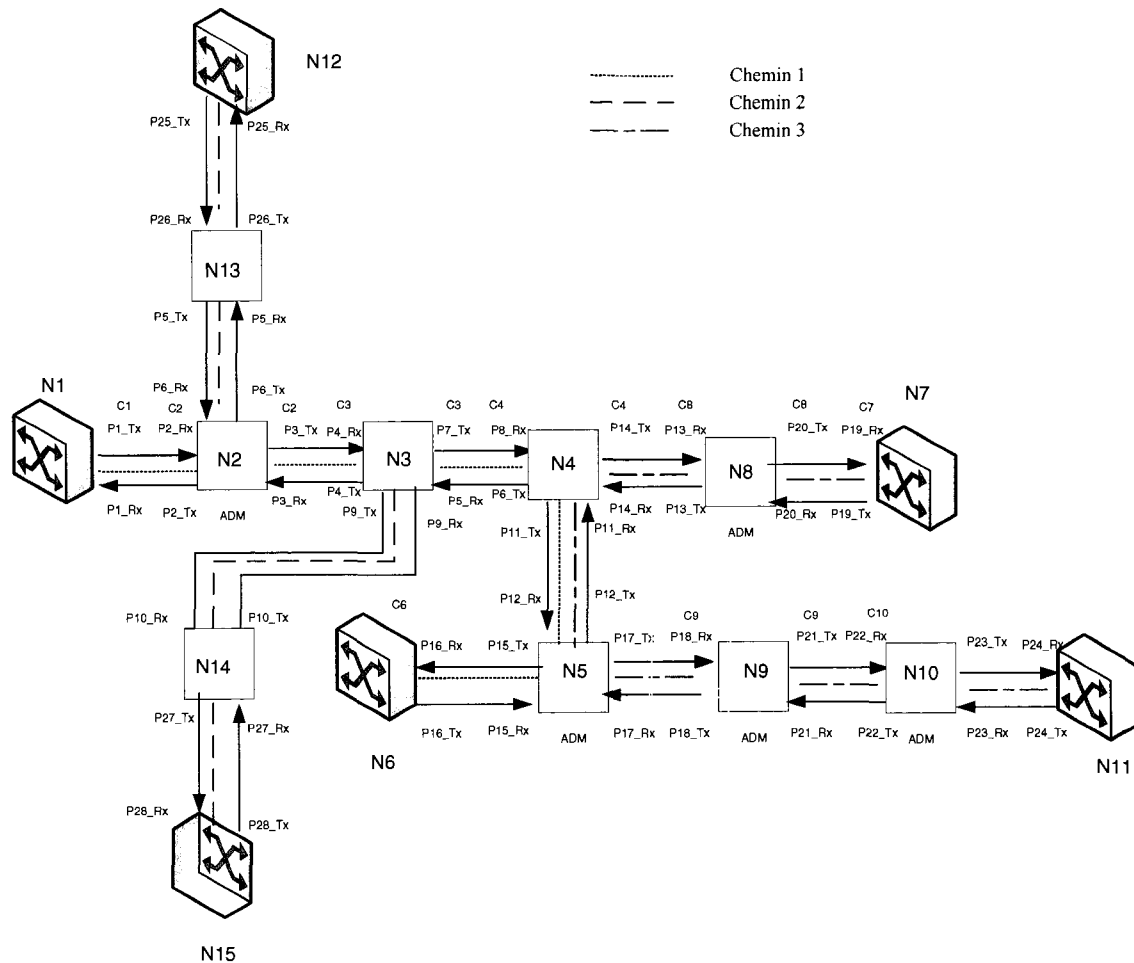


Figure 3.2 : Réseau optique avec trois chemins optiques

3.3 Modèle 1

3.3.1 Générateur d'alarmes du modèle 1

À partir du réseau obtenu, nous générons des pannes sur les liens. Par conséquent, des alarmes SONET sont propagées. La procédure que nous avons implémentée pour la propagation des alarmes est comme suit :

Étape 1 : Établir un modèle d'un réseau optique tout en ayant les différents chemins optiques.

Affecter des ports pour chaque lien du réseau

Donner le nombre de chemins qu'on veut avoir dans le réseau

Donner le nœud de source « i » et de destination « j » de chaque chemin

Pour chaque source i et destination j

Trouver le plus court chemin k en se basant sur l'algorithme de Dijkstra [20] .

Étape 2 : Créer une panne simple dans le réseau.

Choisir un port p qui sera en panne

Indiquer le moment de la panne

Étape 3 : Propager les alarmes SONET dans le réseau

Pour chaque chemin k

Si le chemin k passe par ce port p,

Affecter les alarmes aux ports passant par ce chemin k, en se basant sur la propagation des alarmes SONET.

Prenons l'exemple suivant afin de mieux comprendre la procédure. Soient trois chemins optiques (tableau 3.2) du réseau de la figure 3.2.

Tableau 3.2 : Les nœuds de source et de destination des chemins optiques

| Chemins optiques | Nœud source | Nœud destination |
|------------------|-------------|------------------|
| 1 | N1 | N6 |
| 2 | N12 | N15 |
| 3 | N7 | N11 |

En appliquant la procédure et en se basant sur les sources et destinations des chemins donnés, les nœuds intermédiaires sont donnés dans le tableau 3.3.

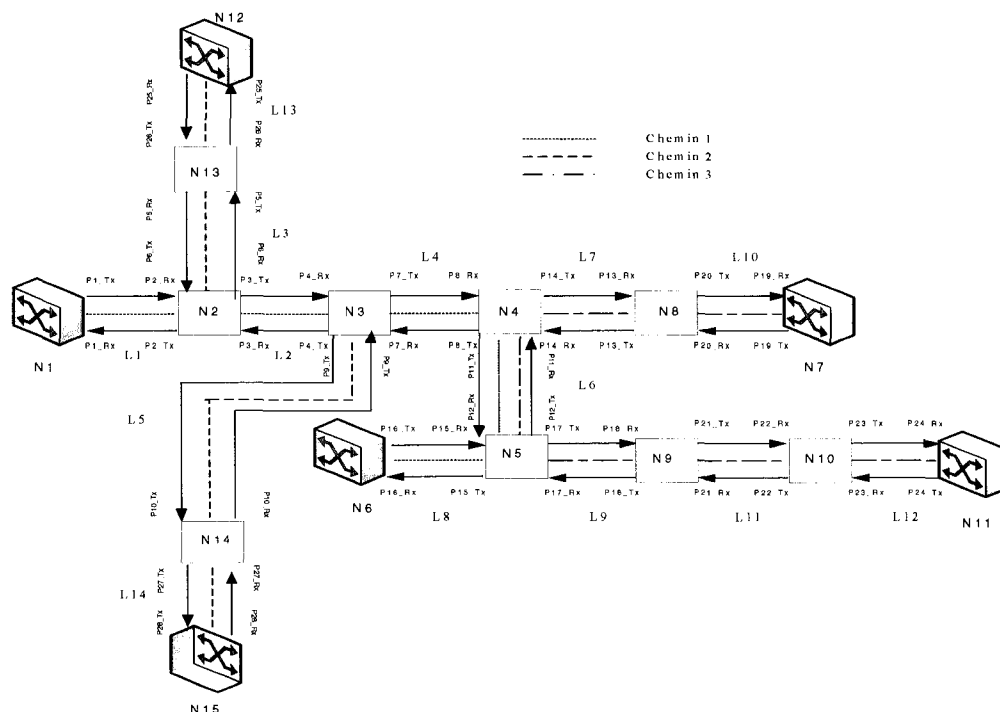
Tableau 3.3 : Les nœuds des chemins optiques

| Chemins optiques | Liste des nœuds |
|------------------|------------------------|
| 1 | N1-N2-N3-N4-N5-N6 |
| 2 | N12-N13-N2-N3-N14-N15 |
| 3 | N7-N8-N4-N5-N9-N10-N11 |

Les liens optiques qui correspondent à ces différents chemins optiques sont présentés dans le tableau 3.4 et représentés dans la figure 3.3.

Tableau 3.4 : Les liens formant les chemins optiques

| Chemins optiques | Liens |
|------------------|--------------------------|
| 1 | 1 – 2 – 4 – 6 – 8 |
| 2 | 13 – 3 – 2 – 5 – 14 |
| 3 | 10 – 7 – 6 – 9 – 11 – 12 |

**Figure 3.3 : Réseau optique avec les liens correspondants**

Les ports de transmission et de réception correspondant aux liens sont présentés dans le tableau 3.5.

Tableau 3.5 : Les liens et ports correspondants

| Liens | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
|-------|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Ports | P1 | P3 | P5 | P7 | P9 | P11 | P13 | P15 | P17 | P19 | P21 | P23 | P25 | P27 |
| | P2 | P4 | P6 | P8 | P10 | P12 | P14 | P16 | P18 | P20 | P22 | P24 | P26 | P28 |

Pour les cartes des nœuds, nous considérons que les ports d'un nœud i sont branchés aux cartes de type i . Si nous prenons comme exemple le nœud 2 de la figure 3.3, les ports de ce dernier sont branchés à la carte 2, les ports du nœud 3 sont branchés à la carte 3 etc.

En se basant sur ce qui a été présenté dans la revue de littérature sur la propagation des alarmes, considérons une panne vers 12 :00 au niveau du port 3 de type transmetteur. En se référant à la matrice des distances entre les nœuds (tableau 3.1) et en supposant que le délai de propagation est de 1 sec/km d'un nœud à un autre, le logiciel nous affiche alors la matrice des alarmes suivante (tableau 3.6) :

Tableau 3.6 : Les alarmes des ports des noeuds sources et destinations

| Ports | Types de l'alarme | Heure de l'alarme (HH :MM :SS) |
|--------|-------------------|--------------------------------|
| P1 Rx | P_RDI | 12 :00 :34 |
| P16 Rx | P_AIS | 12 :00 :45 |
| P25 Rx | P_RDI | 12 :00 :43 |
| P28 Rx | P_AIS | 12 :00 :30 |

3.3.2 Description formelle du problème

À partir des alarmes que nous avons générées sur les ports des sources S_i et des destinations D_i , notre objectif est de déterminer les emplacements possibles de la panne.

Pour ce faire, nous allons nous baser sur la programmation par contraintes. Ainsi, à partir des données, nous allons décrire les contraintes pour résolution dans OPL.

Les hypothèses considérées sont les suivantes :

- des pannes simples : nous ne pouvons pas avoir deux pannes en même temps;
- les liens sont bidirectionnels;
- le routage se base sur la méthode du plus court chemin;
- il n'y a pas d'alarmes perdues;
- il n'y a pas de fausses alarmes et
- sachant que le taux de transmission sur une fibre optique est de $5 \mu\text{s/km}$, nous considérerons que le taux est de 1 sec/km pour faciliter la représentation de l'aspect temporel dans les figures des exemples que nous allons présenter.

Pour modéliser ce problème sous la forme d'un CSP, il s'agit d'identifier les variables, les domaines de valeur de ces variables et les contraintes existantes entre ces variables. Nous avons quatre variables :

- état des ports noté par E_p ;
- état des nœuds noté par E_N ;
- état du lien noté par E_L et
- état de la carte noté par E_c .

Nous avons défini ces variables puisque nous pouvons avoir une panne au niveau de la fibre optique ou d'un port ou d'une carte d'interface ou du nœud optique.

Les ensembles de notre modèle sont ainsi définis comme suit :

| | |
|------------------|---|
| N | : ensemble des nœuds optiques; |
| M | : ensemble des chemins optiques; |
| L | : ensemble des liens; |
| P | : ensemble des ports des nœuds optiques; |
| T | : ensemble des types des ports; |
| C | : ensemble des cartes; |
| A | : ensemble des alarmes; |
| L_m | : ensemble des liens appartenant au chemin optique m; |
| l^- | : correspond à la première extrémité d'un lien l; |
| l^+ | : correspond à la deuxième extrémité d'un lien l; |
| $\text{Prem}(m)$ | : correspond au premier lien de L_m ; |

Der(m) : correspond au dernier lien de L_m ;
 Succ(l) : correspond à un successeur d'un lien l et
 Pred(l) : correspond à un prédécesseur d'un lien l.

$D(N) = \{ n1, n2, \dots, n_{Nb_Nœud} \};$
 $D(M) = \{ m1, m2, \dots, m_{Nb_Chemin} \};$
 $D(L) = \{ l1, l2, \dots, l_{Nb_Lien} \};$
 $D(P) = \{ p1, p2, \dots, p_{Nb_Port} \};$
 $D(T) = \{ Tx, Rx \};$
 $D(C) = \{ c1, c2, \dots, c_{Nb_Carte} \};$
 $D(A) = \{ L_RDI, P_RDI, L_AIS, P_AIS, LOS \}$ et
 $D\{Ep\} = D\{E_L\} = D\{E_N\} = D\{E_C\} = \{up, down\}.$

3.3.3 Modélisation mathématique du modèle 1

Contrainte1 :

$$\begin{aligned}
 AI[l^-, Rx] = P_L_RDI \iff & E_P[l^-, Tx] = down \vee \\
 & E_L[l^-] = down \vee \\
 & E_C[l^-] = down \vee \\
 & E_N[l^-] = down \qquad \qquad \qquad \forall m \in M \text{ et } \forall l \in L_m
 \end{aligned}$$

Contrainte2 :

$$\begin{aligned}
 AI[l^+, Rx] = P_L_RDI \iff & E_P[l^+, Tx] = down \vee \\
 & E_L[l^+] = down \vee \\
 & E_C[l^+] = down \vee \\
 & E_N[l^+] = down \qquad \qquad \qquad \forall m \in M \text{ et } \forall l \in L_m
 \end{aligned}$$

Puisque nous avons des liens bidirectionnels, il faut alors tenir compte des deux sens des liens. Cependant, les contraintes 1 et 2 traitent le cas où nous avons une alarme de type P_RDI et L_RDI.

Selon la contrainte 1, si nous avons une alarme de type P_RDI et L_RDI au niveau du premier port de type récepteur d'un lien l appartenant à un chemin optique m, nous aurons alors une panne au niveau du premier port de type transmetteur appartenant

au même lien l ou au niveau du lien l ou au niveau de la carte à laquelle la première extrémité du lien l est attaché ou au niveau du nœud auquel la première extrémité du lien l est attachée. Pour mieux comprendre cette contrainte, prenons l'exemple de la figure 3.4 où nous avons 7 nœuds optiques. Si nous avons une panne au niveau du port 5 de type transmetteur du nœud 3 et appartenant au lien 3, nous aurons une alarme de type P_RDI et L_RDI au niveau du port 5 mais de type récepteur, appartenant au même lien. La panne peut être aussi au niveau de la carte du port P5_Tx ou au niveau du lien L3 lié au port P5_Tx ou au niveau du nœud N3.

La contrainte 2 traite le sens inverse des liens. Considérons le même exemple de réseau de la figure 3.4 mais en ayant une panne au niveau de l'autre extrémité du lien (figure 3.5), soit le port 6 de type transmetteur du nœud 4 et appartenant au lien 3. Nous aurons alors une alarme de type P_RDI et L_RDI au niveau du port 6 de type récepteur, appartenant au même lien. La panne peut être aussi au niveau de la carte du port P6_Tx ou au niveau du lien L3 lié au port P6_Tx ou au niveau du nœud N4.

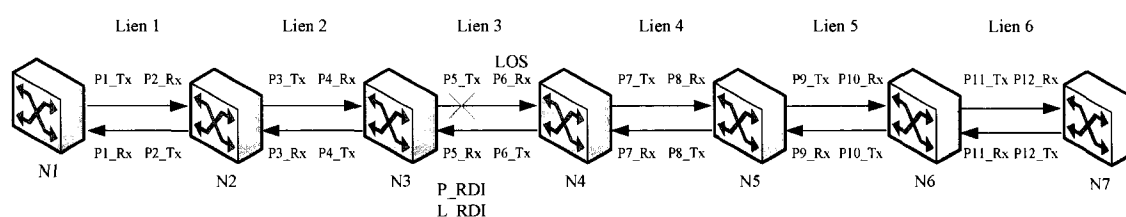


Figure 3.4 : Exemple pour la contrainte 1

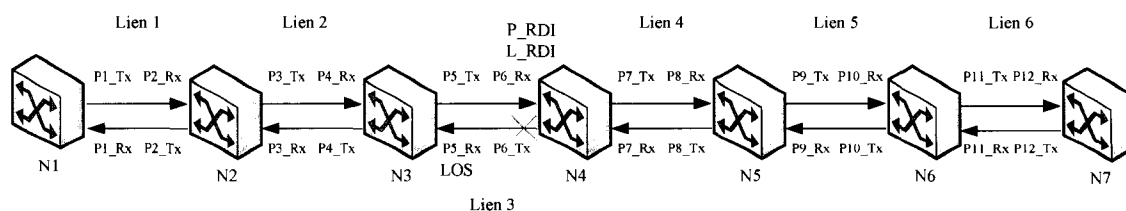


Figure 3.5 : Exemple pour la contrainte 2

Contrainte 3 :

$$\begin{aligned}
 Al[l^-, Rx] = P_L_AIS \quad &\Leftrightarrow \quad E_p[(succ(l, m))^+, Tx] = \text{down} \vee \\
 &E_L[(succ(l, m))^+] = \text{down} \vee \\
 &E_C[(succ(l, m))^+] = \text{down} \vee \\
 &E_N[(succ(l, m))^+] = \text{down} \quad \forall m \in M \text{ et } \forall l \in L_m
 \end{aligned}$$

Contrainte 4 :

$$\begin{aligned}
 Al[l^+, Rx] = P_L_AIS \quad &\Leftrightarrow \quad E_p[(pred(l, m))^- , Tx] = \text{down} \vee \\
 &E_L[(pred(l, m))^-] = \text{down} \vee \\
 &E_C[(pred(l, m))^-] = \text{down} \vee \\
 &E_N[(pred(l, m))^-] = \text{down} \quad \forall m \in M \text{ et } \forall l \in L_m
 \end{aligned}$$

En se basant sur le fait que les liens sont bidirectionnels, les contraintes 3 et 4 traitent le même type d'alarme (P_AIS et L_AIS) mais dans les deux sens. Ainsi, selon la contrainte 3, si nous avons une panne au niveau du deuxième port de type transmetteur d'un lien l , alors nous aurons une alarme de type P_AIS et L_AIS au niveau du premier port du lien $l-l$. La panne peut être aussi soit au niveau du lien l , soit au niveau de la carte ou au niveau du nœud auxquels ce deuxième port est relié. Pour mieux comprendre cette contrainte, prenons l'exemple de la figure 3.6 où nous avons une panne au niveau du lien 3 lié au port 6 de type transmetteur du nœud 4. Nous aurons alors une alarme de type P_AIS et L_AIS au niveau du port 3, de type récepteur, lié au nœud 2 et appartenant au lien 2. La panne peut être aussi au niveau du port P6_Tx ou au niveau de la carte du port P6_Tx ou au niveau du nœud N4.

La contrainte 4 traite le sens inverse des liens. Considérons le même exemple de réseau de la figure 3.6 mais en ayant une panne au niveau de l'autre extrémité du lien (figure 3.7). Nous aurons alors une alarme de type P_AIS et L_AIS au niveau du port 8, de type récepteur, lié au nœud 5 et appartenant au lien 4. La panne peut être aussi au niveau du port P5_Tx ou au niveau de la carte du port P5_Tx ou au niveau du nœud N3.

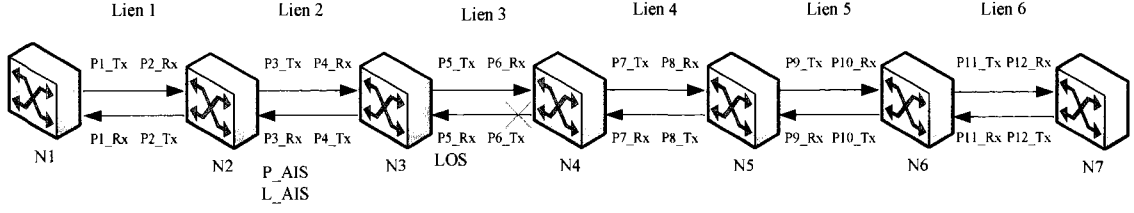


Figure 3.6 : Exemple pour la contrainte 3

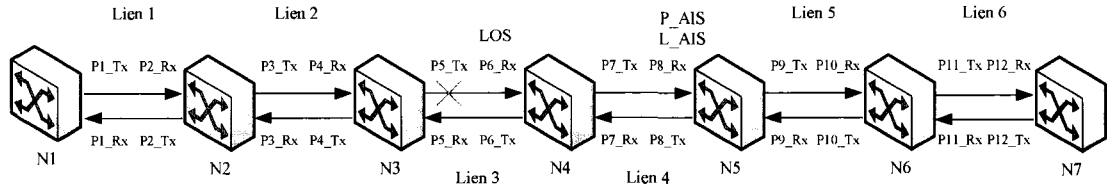


Figure 3.7 : Exemple pour la contrainte 4

Contrainte 5 :

$$\begin{aligned}
 Al[l^-, Rx] = P_AIS \iff & \sum_{k=succ(succ(l,m))}^{pred(der(m))} (E_p[k^+, Tx] = down) = 1 \vee \\
 & \sum_{k=succ(succ(l,m))}^{pred(der(m))} (E_L[k^+] = down) = 1 \vee \\
 & \sum_{k=succ(succ(l,m))}^{pred(der(m))} (E_C[k^+] = down) = 1 \vee \\
 & \sum_{k=succ(succ(l,m))}^{pred(der(m))} (E_N[k^+] = down) = 1 \quad \forall m \in M \text{ et } \forall l \in L_m
 \end{aligned}$$

Contrainte 6 :

$$\begin{aligned}
 Al[l^+, Rx] = P_AIS \iff & \sum_{k=succ(prem(m))}^{pred(pred(l,m))} (E_p[k^-, Tx] = down) = 1 \vee \\
 & \sum_{k=succ(prem(m))}^{pred(pred(l,m))} (E_L[k^-] = down) = 1 \vee \\
 & \sum_{k=succ(prem(m))}^{pred(pred(l,m))} (E_C[k^-] = down) = 1 \vee
 \end{aligned}$$

$$\sum_{k=\text{succ}(\text{prem}(m))}^{\text{pred}(\text{pred}(l,m))} (E_N[k^-] = \text{down}) = 1 \quad \forall m \in M \text{ et } \forall l \in L_m$$

Le même principe s'applique pour les contraintes 5 et 6. Elles traitent le même type d'alarme (P_AIS) mais dans les deux sens. Cependant, la contrainte 5 traite le cas où nous avons une alarme de type P_AIS au niveau du premier port d'un lien l appartenant à un chemin optique m . Nous aurons alors une panne au niveau d'un deuxième port du lien $l+2$, ou une panne au niveau du deuxième port du lien $l+3$ jusqu'à ce que l soit égal à l'avant dernier lien du chemin optique m . Le même principe s'applique pour les pannes au niveau des liens, des cartes et des nœuds de ces ports. Pour mieux comprendre cette contrainte, considérons l'exemple de la figure 3.8 où nous avons une alarme de type P_AIS au niveau du port 1, de type récepteur, lié au nœud 1 et appartenant au lien 1. Nous aurons alors une panne soit au niveau du lien 3 lié au port 6 de type transmetteur du nœud 4, soit une panne au niveau du lien 4 lié au port 8 de type transmetteur du nœud 5, ou une panne au niveau du lien 5 lié au port 10 de type transmetteur du nœud 6.

La contrainte 6 traite le sens inverse des liens. Considérons l'exemple de la figure 3.9 où nous avons une alarme de type P_AIS au niveau du port 12, de type récepteur, lié au nœud 7 et appartenant au lien 6. Nous aurons alors soit une panne au niveau du lien 2 lié au port 3 de type transmetteur du nœud 2, soit une panne au niveau du lien 3 lié au port 5 de type transmetteur du nœud 3, ou une panne au niveau du lien 4 lié au port 7 de type transmetteur du nœud 4.

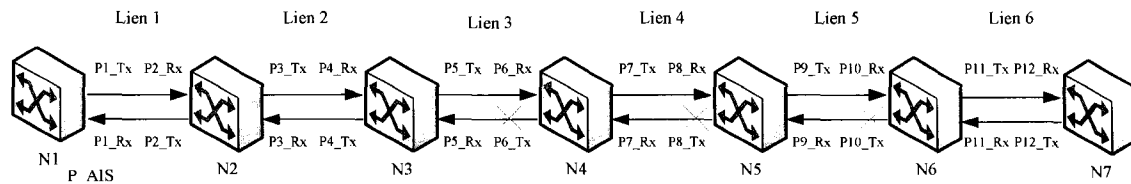


Figure 3.8 : Exemple pour la contrainte 5

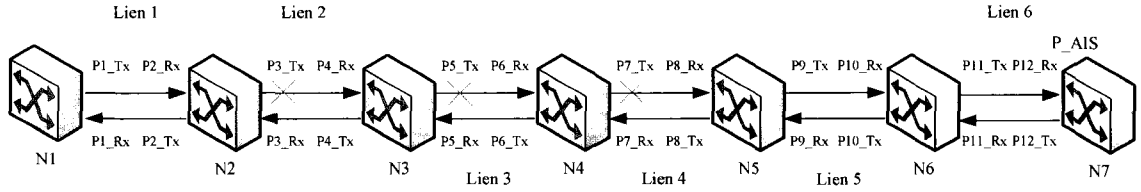


Figure 3.9 : Exemple pour la contrainte 6

Contrainte 7 :

$$\begin{aligned}
 Al[l^-, Rx] = P_RDI \Leftrightarrow & \sum_{k=succ(l,m)}^{pred(der(m))} (E_p[k^-, Tx] = down) = 1 \vee \\
 & \sum_{k=succ(l,m)}^{pred(der(m))} (E_L[k^-] = down) = 1 \vee \\
 & \sum_{k=succ(l,m)}^{pred(der(m))} (E_C[k^-] = down) = 1 \vee \\
 & \sum_{k=succ(l,m)}^{pred(der(m))} (E_N[k^-] = down) = 1 \quad \forall m \in M \text{ et } \forall l \in L_m
 \end{aligned}$$

Contrainte 8 :

$$\begin{aligned}
 Al[l^+, Rx] = P_RDI \Leftrightarrow & \sum_{k=succ(prem(m))}^{pred(l,m)} (E_p[k^+, Tx] = down) = 1 \vee \\
 & \sum_{k=succ(prem(m))}^{pred(l,m)} (E_L[k^+] = down) = 1 \vee \\
 & \sum_{k=succ(prem(m))}^{pred(l,m)} (E_C[k^+] = down) = 1 \vee \\
 & \sum_{k=succ(prem(m))}^{pred(l,m)} (E_N[k^+] = down) = 1 \quad \forall m \in M \text{ et } \forall l \in L_m
 \end{aligned}$$

Les contraintes 7 et 8 traitent le cas où nous avons une alarme de type P_RDI. Nous présenterons juste la contrainte 7 puisque le raisonnement de la contrainte 8 est similaire à celui de la contrainte 7 mais dans le sens inverse.

Considérons une alarme de type P_RDI au niveau du premier port du lien l appartenant à un chemin optique m . Nous aurons alors soit une panne au niveau du premier port d'un lien $l+1$, ou une panne au niveau du premier port du lien $l+2$ jusqu'à ce que l soit égal à l'avant dernier lien du chemin optique m . Le même principe de panne s'applique pour les liens, les cartes et les nœuds de ces ports. L'exemple de la figure 3.10 illustre le cas où nous avons une alarme de type P_RDI au niveau du port 1, de type récepteur, lié au nœud 1 et appartenant au lien 1. Nous aurons alors soit une panne au niveau du lien 2 lié au port 3 de type transmetteur du nœud 2, soit une panne au niveau du lien 3 lié au port 5 de type transmetteur du nœud 3.

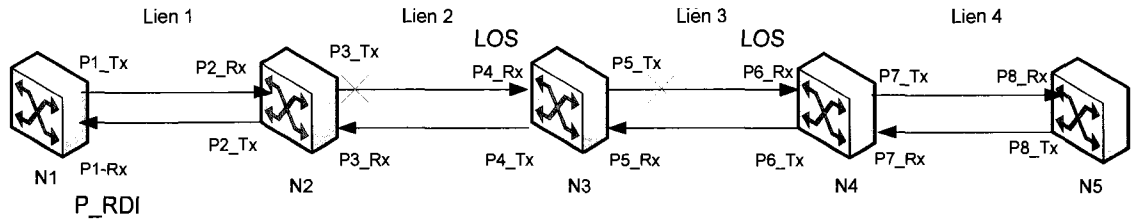


Figure 3.10 : Exemple pour la contrainte 7

Contrainte 9 : Contrainte pour le temps de propagation

$$E_p[l^-, Tx] = \text{down} \quad \vee \quad E_L[l^-] = \text{down} \quad \vee$$

$$E_C[l^-] = \text{down} \quad \vee \quad E_N[l^-] = \text{down} \quad \vee$$

$$E_p[l^+, Tx] = \text{down} \quad \vee \quad E_L[l^+] = \text{down} \quad \vee$$

$$E_C[l^+] = \text{down} \quad \vee \quad E_N[l^+] = \text{down} \quad \vee$$

\Rightarrow

$$\text{Temps}[Al[(\text{prem}(m))^- , Rx]] - \sum_{k=\text{prem}(m)}^l \text{Temps}[Al[k^-, Rx]]$$

=

$$\text{Temps}[Al[(\text{dern}(m))^+ , Rx]] - \sum_{k=l}^{\text{dern}(m)} \text{Temps}[Al[k^+, Rx]]$$

$$\forall m \in M \text{ et } \forall l \in L_m$$

La contrainte 9 permet de tenir compte de l'aspect temporel de propagation des alarmes. Considérons l'exemple de la figure 3.11 où nous avons une panne au temps t_i au niveau du port 3, de type transmetteur, lié au nœud 2 et appartenant au lien 2, nous aurons alors une alarme de type P_RDI et L_RDI au niveau du port 3, de type récepteur au temps $t_i + \text{temps de propagation de N2 à N3} + \text{temps de propagation du nœud N3 à N2}$. Nous obtenons ainsi une alarme de type P_RDI, lié au port 1, de type récepteur, à l'instant $t_i + (tp_{2-3} + tp_{3-2}) + tp_{2-1}$. Avec le même raisonnement, nous obtenons une alarme de type P_AIS à l'instant $t_i + (tp_{2-3} + tp_{3-4} + tp_{4-5})$. L'aspect temporel nous permet de trouver l'emplacement exact de la panne.

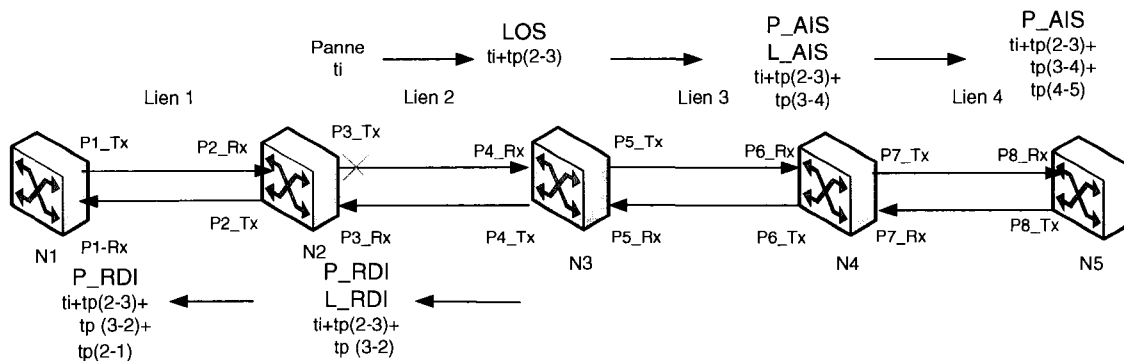


Figure 3.11 : Exemple pour la contrainte 9

Contrainte 10 : panne simple

$$\sum_{i \in P} (E_p[i] = \text{down}) + \sum_{i \in C} (E_C[i] = \text{down}) + \sum_{i \in N} (E_N[i] = \text{down}) + \sum_{i \in L} (E_L[i] = \text{down}) \leq 1$$

En se basant sur les alarmes SONET, ce modèle nous permet de détecter une panne simple dans un réseau optique. Il tient compte de la nature des alarmes ainsi que de leurs aspects temporels. En effet, en ayant l'alarme et le moment de cette dernière, ce modèle permet de traiter tous les cas possibles de panne en se basant sur le temps de propagation de la panne. De ce fait, il compare les temps de propagation des alarmes avec celles des nœuds sources et destinations. Ainsi, ce modèle détecte les pannes mais

ne détecte pas le moment de ces dernières. Pour ce faire, nous allons implanter un nouveau modèle où nous rajouterons une nouvelle variable, soit le temps de la panne. En se basant sur l'aspect temporel et sur les types d'alarmes, ce deuxième modèle nous permettra de détecter l'emplacement et le moment des pannes simples.

3.4 *Modèle 2*

Le deuxième modèle est basé sur les mêmes hypothèses décrites dans le premier modèle. Son ensemble est défini comme suit :

| | |
|-------------|--|
| N | : ensemble des nœuds optiques; |
| M | : ensemble des chemins optiques; |
| L | : ensemble des liens; |
| P | : ensemble des ports des nœuds optiques; |
| T | : ensemble des types des ports; |
| C | : ensemble des cartes; |
| A | : ensemble des alarmes; |
| L_m | : ensemble des liens appartenant au chemin optique m ; |
| l^- | : correspond à la première extrémité d'un lien l ; |
| l^+ | : correspond à la deuxième extrémité d'un lien l ; |
| Prem(m) | : correspond au premier lien de L_m ; |
| Der(m) | : correspond au dernier lien de L_m ; |
| Succ(l) | : correspond à un successeur d'un lien l et |
| Pred(l) | : correspond à un prédécesseur d'un lien l . |

Nous avons défini deux variables :

- équipements en panne noté par E_q et
- temps de la panne noté par T_{Panne}

La variable E_q correspond aux équipements qui pourront être en panne. Soit un nœud optique, soit un port, soit un lien ou soit une carte. La deuxième variable T_{Panne} permet de déterminer le temps de la panne.

Les domaines de l'ensemble sont comme suit :

$$\begin{aligned}
 D(N) &= \{ n1, n2, \dots, n_{\text{Nb_Nœud}} \}; \\
 D(M) &= \{ m1, m2, \dots, m_{\text{Nb_Chemin}} \}; \\
 D(L) &= \{ l1, l2, \dots, l_{\text{Nb_Lien}} \}; \\
 D(P) &= \{ p1, p2, \dots, p_{\text{Nb_Port}} \}; \\
 D(T) &= \{ T_x, R_x \}; \\
 D(C) &= \{ c1, c2, \dots, c_{\text{Nb_Carte}} \}; \\
 D(A) &= \{ L_RDI, P_RDI, L_AIS, P_AIS, LOS \}; \\
 D(Eq) &= D(N) \cup D(C) \cup D(P) \cup D(L) \text{ et} \\
 D(T_{\text{Panne}}) &= \{ 1..84600 \}.
 \end{aligned}$$

3.4.1 Générateur d'alarmes du modèle 2

Le générateur d'alarmes est aussi similaire à celui du premier modèle. La seule différence est l'ajout de l'étape 4 qui consiste à calculer le délai de propagation de chaque port par rapport aux ports des sources et de destinations.

Dans le premier modèle, c'est la contrainte 9 qui permettait de comparer les temps de propagation des alarmes avec celles des nœuds sources et destinations mais nous n'avions pas de variable pour calculer le temps de la panne. Ceci n'empêche pas que nous trouvons la panne mais les informations seront incomplètes pour le gestionnaire du réseau. De ce fait, l'ajout de la quatrième étape permet d'ajouter à notre deuxième modèle OPL une nouvelle variable qui est le temps de la panne. Cette dernière se basera sur la matrice des délais entre les ports et nous permettra ainsi de déterminer l'emplacement et le moment de la panne.

La procédure que nous avons implémentée pour la propagation des alarmes, est comme suit :

Étape 1 : Établir un modèle d'un réseau optique tout en ayant les différents chemins optiques.

Affecter des ports pour chaque lien du réseau

Donner le nombre de chemins qu'on veut avoir dans le réseau

Donner le nœud de source « i » et de destination « j » de chaque chemin

Pour chaque source i et destination j

Trouver le plus court chemin k en se basant sur l'algorithme de Dijkstra .

Étape 2 : Créer une panne simple dans le réseau.

Choisir un port p qui sera en panne

Indiquer le moment de la panne

Étape 3 : Propager les alarmes SONET dans le réseau

Pour chaque chemin k

Si le chemin k passe par ce port p,

Affecter les alarmes aux ports passant par ce chemin k, en se basant sur la propagation des alarmes SONET.

Étape 4 : Calcul du délai de propagation

Pour chaque port p

Pour chaque chemin k

Si le chemin k passe par ce port p,

Calculer le délai de propagation de ce port p jusqu'aux ports des source et destination de k

Si nous prenons le même exemple que nous avons décrit précédemment (figure 3.12), ce générateur d'alarmes nous affiche la même matrice d'alarmes que celle du modèle 1 (tableau 3.6) mais il nous rajoute la matrice des délais entre les ports. Considérons le cas du port 3 qui est relié au nœud 2 de type transmetteur (P3_Tx), la matrice des délais (en secondes) est alors illustrée au tableau 3.7 de ce port par rapport aux ports sources et destinations des chemins optiques passant par ce dernier.

Tableau 3.7 : Délai du port P3 Tx

| | P1_Rx | P16_Rx | P25_Rx | P28_Rx |
|-------|-------|--------|--------|--------|
| P3_Tx | 34 | 45 | 43 | 30 |

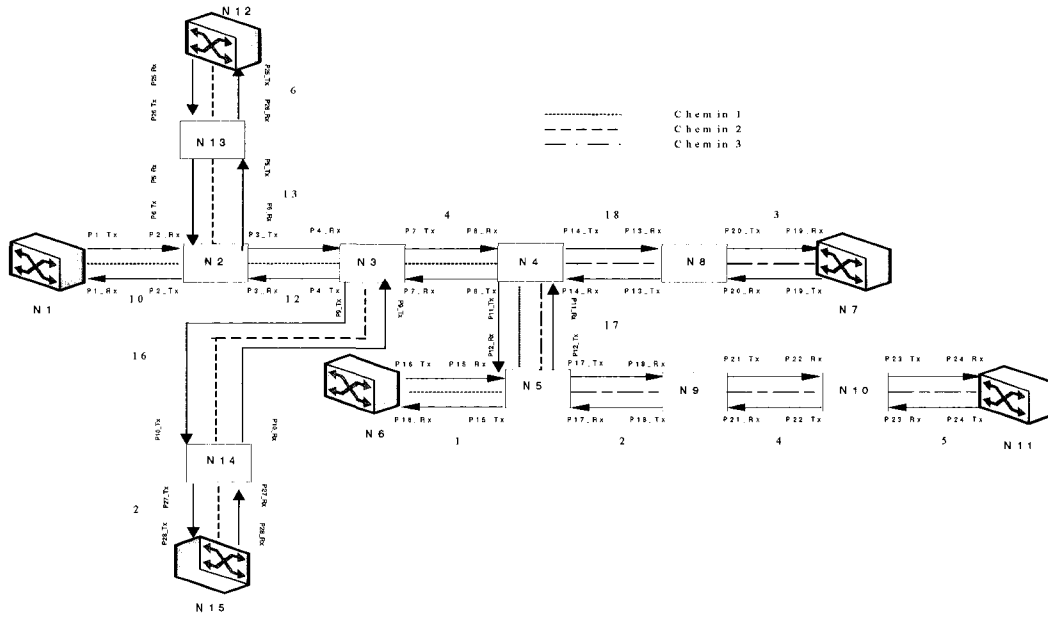


Figure 3.12 : Réseau optique avec les distances correspondants

3.4.2 Modélisation mathématique du modèle 2

Le raisonnement des contraintes que nous allons définir est similaire à celui du premier modèle. De ce fait, il faut se référer aux figures correspondantes que nous avons déjà traitées dans le premier modèle.

Contrainte 1 :

$$\begin{aligned}
 Al[l^-, Rx] = P_L_RDI \Leftrightarrow & \left(\begin{aligned} & Eq = l \quad \vee \\ & Eq = P[l^-, Tx] \vee \\ & Eq = C[l^-] \quad \vee \\ & Eq = N[l^-] \end{aligned} \right) \& \\
 T_{panne} = & Temps[Al[l^-, Rx]] - 2 * Temps(P[l^-, Tx], P[l^+, Rx])
 \end{aligned}$$

$$\forall m \in M \text{ et } \forall l \in L_m$$

Contrainte 2 :

$$\begin{aligned}
 Al[l^+, Rx] = P_L_RDI \iff & (Eq = l \quad \vee \\
 & Eq = P[l^+, Tx] \vee \\
 & Eq = C[l^+] \quad \vee \\
 & Eq = N[l^+]) \ \& \\
 T_{panne} = & Temps[Al[l^+, Rx]] - 2 * Temps(P[l^+, Tx], P[l^-, Rx])
 \end{aligned}$$

$$\forall m \in M \text{ et } \forall l \in L_m$$

Contrainte 3 :

$$\begin{aligned}
 Al[l^-, Rx] = P_L_AIS \iff & (Eq = succ(l, m) \quad \vee \\
 & Eq = P[(succ(l, m))^+, Tx] \vee \\
 & Eq = C[(succ(l, m))^+] \quad \vee \\
 & Eq = N[(succ(l, m))^+]) \ \& \\
 T_{panne} = & Temps[Al[l^-, Rx]] - \sum_{j=l}^{succ(l, m)} Temps(P[j^+, Tx], P[j^-, Rx])
 \end{aligned}$$

$$\forall m \in M \text{ et } \forall l \in L_m$$

Contrainte 4 :

$$\begin{aligned}
 Al[l^+, Rx] = P_L_AIS \iff & (Eq = pred(l, m) \quad \vee \\
 & Eq = P[(pred(l, m))^-, Tx] \vee \\
 & Eq = C[(pred(l, m))^-] \quad \vee \\
 & Eq = N[(pred(l, m))^-]) \ \& \\
 T_{panne} = & Temps[Al[l^+, Rx]] - \sum_{j=pred(l, m)}^l Temps(P[j^-, Tx], P[j^+, Rx])
 \end{aligned}$$

$$\forall m \in M \text{ et } \forall l \in L_m$$

Contrainte 5 :

$$Al[l^-, Rx] = P_AIS \iff \forall (k \in [succ(succ(l, m), pred(der(m))])$$

$$\begin{aligned} & (\\ & (Eq = k \quad \vee \\ & \quad Eq = P[k^+, Tx] \vee \\ & \quad Eq = C[k^+] \quad \vee \\ & \quad Eq = N[k^+]) \quad \& \end{aligned}$$

$$T_{panne} = Temps[Al[l^-, Rx]] - \sum_{j=l}^k Temps(P[j^+, Tx], P[j^-, Rx])$$

)

$$\forall m \in M \text{ et } \forall l \in L_m$$

Contrainte 6 :

$$Al[l^+, Rx] = P_AIS \iff \forall (k \in [succ(pred(m), pred(pred(l, m))])$$

$$\begin{aligned} & (\\ & (Eq = k \quad \vee \\ & \quad Eq = P[k^-, Tx] \vee \\ & \quad Eq = C[k^-] \quad \vee \\ & \quad Eq = N[k^-]) \quad \& \end{aligned}$$

$$T_{panne} = Temps[Al[l^+, Rx]] - \sum_{j=k}^l Temps(P[j^-, Tx], P[j^+, Rx])$$

)

$$\forall m \in M \text{ et } \forall l \in L_m$$

Contrainte 7 :

$$Al[l^-, Rx] = P_RDI \Leftrightarrow \vee (k \in [succ(l, m), pred(der(m))])$$

$$\begin{aligned} & (\\ & \quad (Eq = k \quad \vee \\ & \quad \quad Eq = P[k^-, Tx] \vee \\ & \quad \quad Eq = C[k^-] \quad \vee \\ & \quad \quad Eq = N[k^-]) \quad \& \end{aligned}$$

$$T_{panne} = Temps[Al[l^-, Rx]] - (Temps(P[k^-, Tx], P[k^+, Rx]) + \sum_{j=l}^k Temps(P[j^+, Tx], P[j^-, Rx]))$$

)

$$\forall m \in M \text{ et } \forall l \in L_m$$

Contrainte 8 :

$$Al[l^+, Rx] = P_RDI \Leftrightarrow \vee (k \in [succ(prem(m)), pred(l, m)])$$

$$\begin{aligned} & (\\ & \quad (Eq = k \quad \vee \\ & \quad \quad Eq = P[k^+, Tx] \vee \\ & \quad \quad Eq = C[k^+] \quad \vee \\ & \quad \quad Eq = N[k^+]) \quad \& \end{aligned}$$

$$T_{panne} = Temps[Al[l^+, Rx]] - (Temps(P[k^+, Tx], P[k^-, Rx]) + \sum_{j=k}^l Temps(P[j^-, Tx], P[j^+, Rx]))$$

)

$$\forall m \in M \text{ et } \forall l \in L_m$$

Chapitre 4 : Analyse des résultats

Dans ce chapitre, nous présenterons les tests de performance de nos deux modèles. Nous avons testé nos algorithmes sur des réseaux de tailles différentes. Nous avons généré des pannes dans ces derniers et en l'occurrence, des alarmes SONET ont été propagées. Ces dernières sont introduites comme données dans nos deux modèles OPL qui proposent ainsi des diagnostics de pannes tout en tenant compte de l'aspect temporel des alarmes. Nous évaluons aussi dans cette section le temps de détection des pannes en fonction de la taille des réseaux et du nombre de chemins optiques.

4.1 Résultats

Pour créer les réseaux, nous avons utilisé un programme qui requiert comme données les liens entre les nœuds, ainsi que leurs distances correspondantes. Dans le premier exemple qui est similaire à celui qui a été représenté dans la section 3.2, nous avons un réseau de 15 nœuds dont la topologie est illustrée au tableau 4.1. En se basant sur ces données, nous obtenons le réseau qui est illustré à la figure 4.1.

Tableau 4.1 : Topologie du réseau

| Noeud 1 | Noeud 2 | Distance |
|---------|---------|----------|
| 1 | 2 | 10 |
| 2 | 3 | 12 |
| 2 | 13 | 13 |
| 3 | 4 | 15 |
| 3 | 14 | 16 |
| 4 | 5 | 17 |
| 4 | 8 | 18 |
| 5 | 6 | 1 |
| 5 | 9 | 2 |
| 7 | 8 | 3 |
| 9 | 10 | 4 |
| 10 | 11 | 5 |
| 12 | 13 | 6 |
| 14 | 15 | 2 |

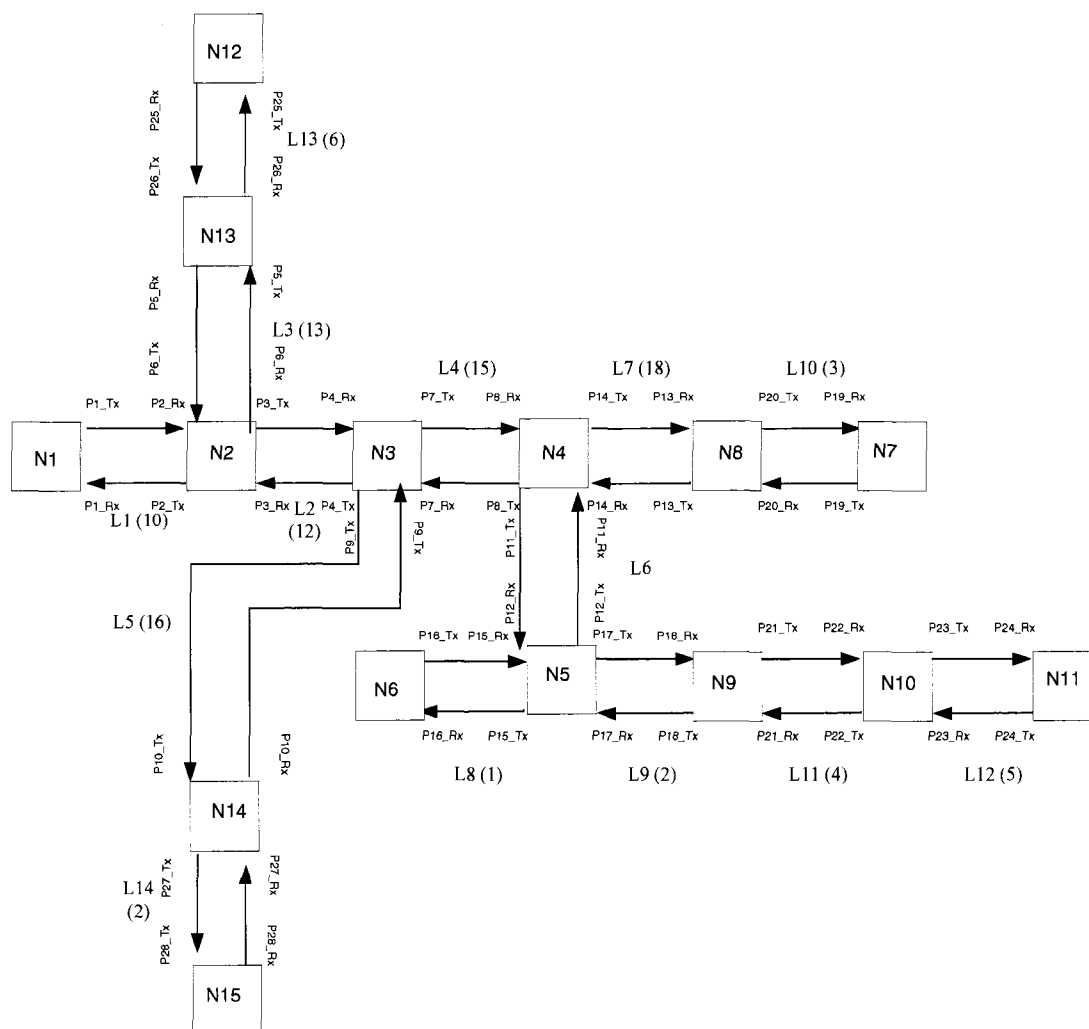


Figure 4.1 : Réseau du premier exemple

Supposons que nous ayons 3 chemins optiques dans ce réseau, comme illustré à la figure 4.2, ayant les nœuds sources et de destinations qui sont présentés dans le tableau 4.2 : la première partie de notre procédure nous affiche tout d'abord les nœuds et les liens, par lesquels les chemins optiques passent, qui sont illustrés respectivement aux tableaux 4.3 et 4.4.

Tableau 4.2 : Les chemins optiques

| Chemins optiques | Nœud source | Nœud destination |
|------------------|-------------|------------------|
| 1 | N1 | N6 |
| 2 | N12 | N15 |
| 3 | N7 | N11 |

Tableau 4.3 : Les nœuds des chemins optiques

| Chemins optiques | Liste des nœuds passant par le chemin optique |
|------------------|---|
| 1 | N1-N2-N3-N4-N5-N6 |
| 2 | N12-N13-N2-N14-N15 |
| 3 | N7-N8-N4-N5-N9-N10-N11 |

Tableau 4.4 : Les liens des chemins optiques

| Chemins optiques | Liens |
|------------------|--------------------------|
| 1 | 1 – 2 – 4 – 6 - 8 |
| 2 | 13 – 3 – 2 – 5 - 14 |
| 3 | 10 – 7 – 6 – 9 – 11 - 12 |

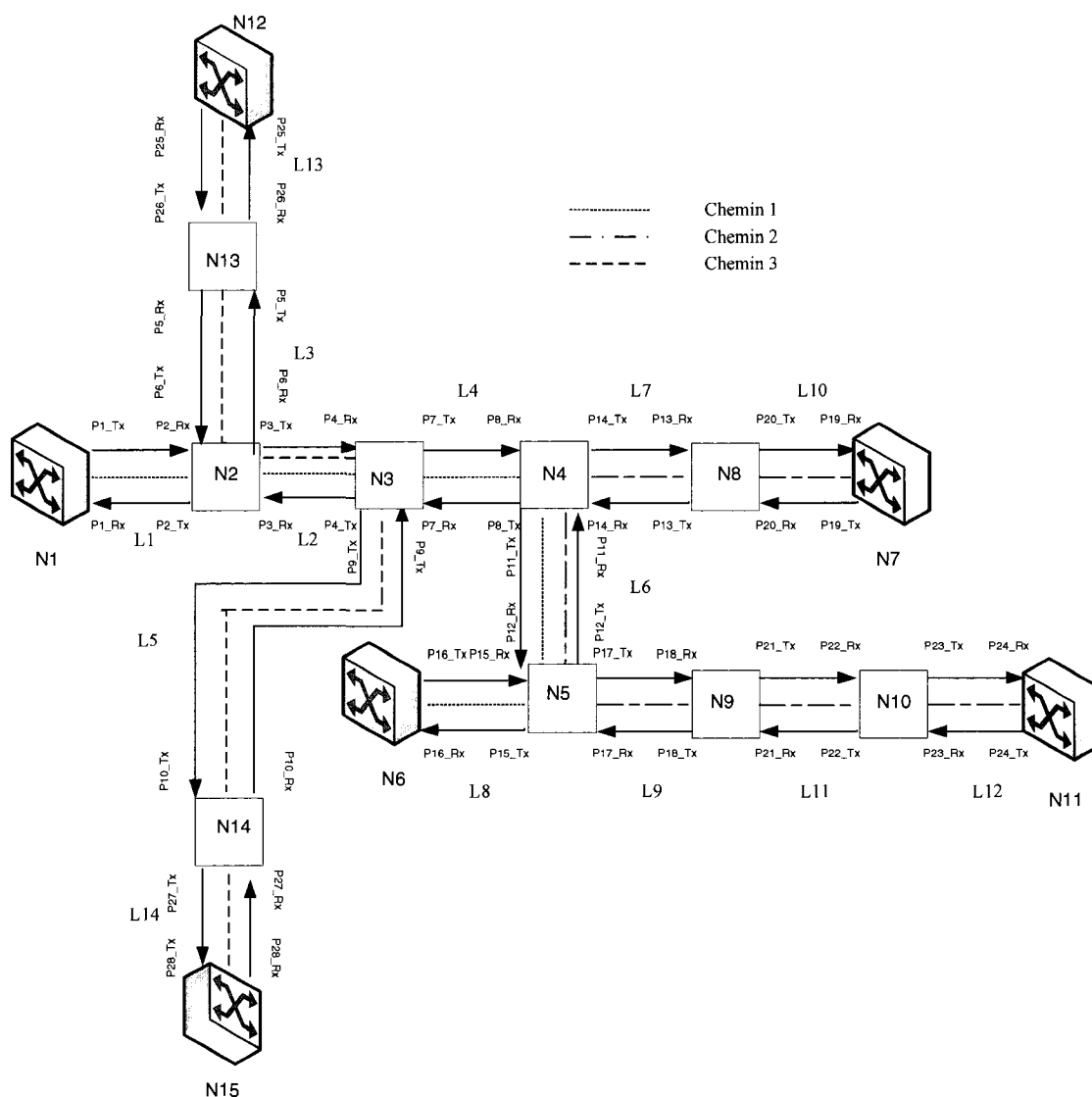


Figure 4.2 : Réseau avec les trois chemins optiques

La deuxième étape de notre procédure nous permet de générer différentes pannes simples dans le réseau. Si par exemple nous générons une panne à 12:00:00 au niveau du port 4 de type transmetteur, lié au nœud 3 et appartenant au lien 2, la troisième partie de l'algorithme nous affiche alors la table suivante des alarmes qui est illustrée au tableau 4.5. Ces alarmes, que le gestionnaire reçoit, sont aussi illustrées à la figure 4.3.

Tableau 4.5 : Table des alarmes des nœuds sources et destinations

| Ports | Types de l'alarme | Heure de l'alarme (HH :MM :SS) |
|--------|-------------------|--------------------------------|
| P1_Rx | P_L_AIS | 12 :00 :22 |
| P16_Rx | P_RDI | 12 :00 :57 |
| P25_Rx | P_AIS | 12 :00 :31 |
| P28_Rx | P_RDI | 12 :00 :42 |

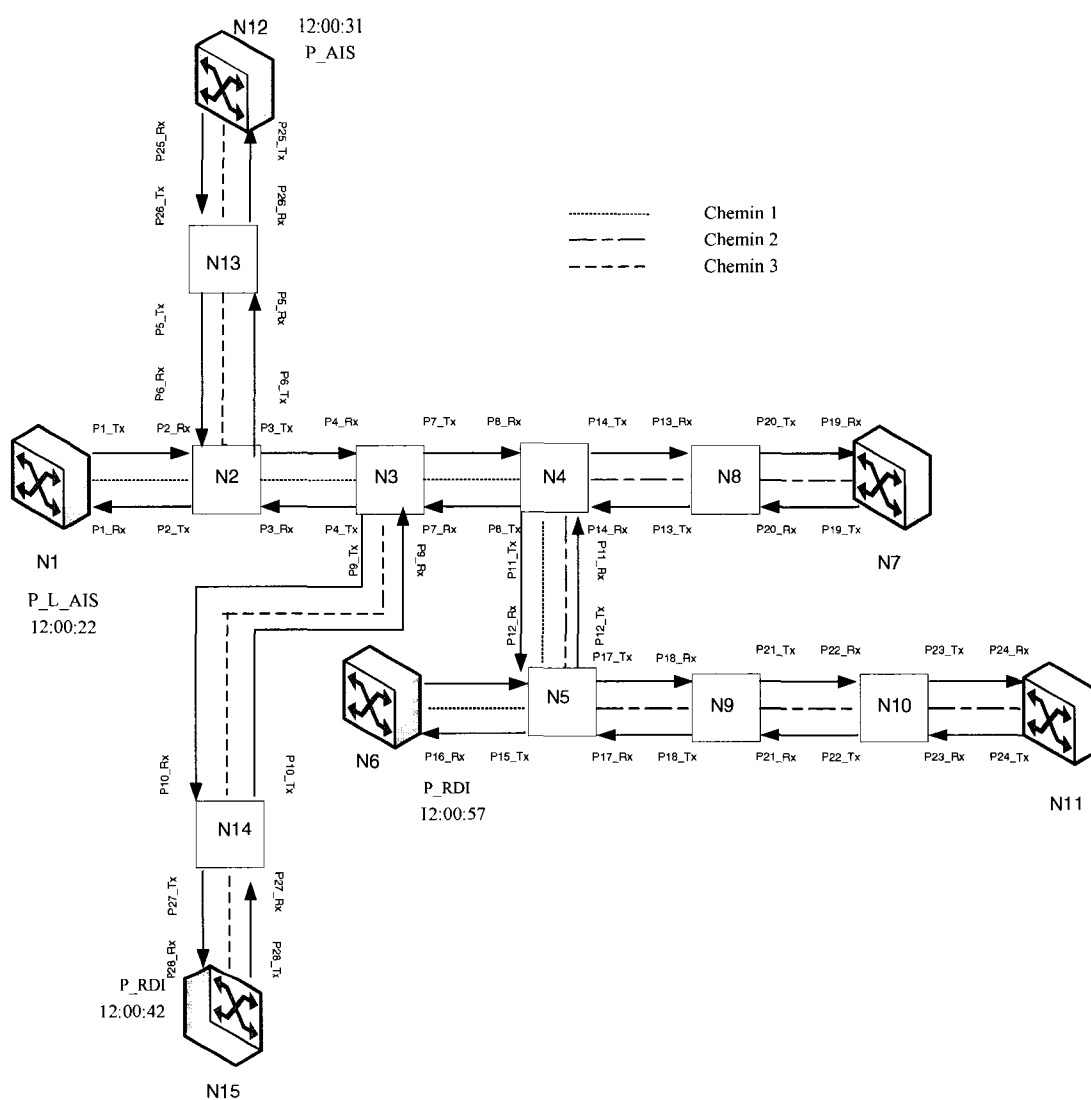


Figure 4.3 : Les alarmes que le gestionnaire de réseau reçoit

Une fois que nous avons la matrice d'alarmes, notre objectif est d'utiliser cette matrice comme donnée pour notre programme OPL, qui à son tour nous permettra de détecter cette panne. Ainsi, le premier modèle OPL nous affiche que l'origine de la panne est soit la fibre qui est reliée au port P4 (lien 2), soit le port P4 (figure 4.4). Pour le deuxième modèle OPL, il nous affiche aussi que la panne est soit au niveau du lien 2, soit le port P4. Il rajoute que le temps de la panne est 12:00:00 (ou 43200 secondes : figure 4.5). En effet, comme illustré à la figure 4.6 et en se basant sur ce qui a été présenté dans la littérature pour la propagation des alarmes, puisque d'une part nous observons des alarmes aux nœuds N1, N15, N12 et N6, la panne ne peut être que dans les liens en commun des deux chemins optiques passant par ces nœuds. D'autre part, si nous nous basons sur le temps de propagation, nous savons que le port 16 du nœud N6 a reçu un P_RDI à 12:00:57. En se basant sur les distances entre les nœuds, qui ont été données dans le tableau 4.1, et que le délai de propagation est de 1s/km (selon les hypothèses considérées dans la section 3.3.2), nous concluons que la panne est au niveau du lien 2, lié au port P4. En effet, si la panne est au niveau du port P4_Tx à 12:00:00, le P3_Rx du nœud 2 recevra alors un LOS à 12:00:12. Ce dernier enverra un P_RDI et L_RDI, noté par P_L_RDI dans la figure 4.6, au port P4_Rx du nœud N3 à 12:00:24. Le nœud N4 recevra ainsi au P8_Rx un P_RDI à 12:00:39, qui enverra à son tour au nœud N5, au port P12_Rx un P_RDI à 12:00:56, et enfin, le nœud N6 recevra au port P16_Rx un P_RDI à 12:00:57. Avec le même raisonnement, le P1_Rx recevra un P_AIS et L_AIS, noté par P_L_AIS dans la figure 4.6 à 12:00:22. Le port P25_Rx du nœud 12 recevra l'alarme P_RDI à 12:00:31 et le port P28_Rx du nœud 15 recevra l'alarme P_RDI à 12:00:42. L'interprétation des délais de propagation des alarmes est illustrée à la figure 4.6.

Nous constatons aussi que la panne est au niveau du port P4 et du lien relié au port P4 et non pas au niveau de la carte 3 et du nœud 3. En effet, le port 4 est relié à la carte 3 du nœud 3. Il faut noter aussi que les ports 7 et 9 du même nœud sont aussi reliés à la carte 3. Ainsi, en cas de panne de cette carte, les ports 7 et 9 seront aussi affectés. Or en se basant sur les types et le délai de propagation des alarmes, nous

concluons que la panne ne peut pas être au niveau de ces ports. En l'occurrence, elle n'est pas au niveau de la carte 3 du nœud 3. Le même raisonnement s'applique pour le cas de panne au niveau du nœud 3.

Le temps d'exécution de OPL pour trouver la panne est de 0.02 sec pour le premier modèle et de 0.01 secondes pour le deuxième modèle qui sont considérés comme des temps d'exécution raisonnables pour trouver une panne dans un réseau ayant 15 nœuds.

| Solution[1]: Etat_Fibre | |
|-------------------------|------|
| Indices | Data |
| P1 | up |
| P2 | up |
| P3 | up |
| P4 | down |
| P5 | up |
| P6 | up |
| P7 | up |
| P8 | up |
| P9 | up |
| P10 | up |
| P11 | up |
| P12 | up |
| P13 | up |
| P14 | up |
| P15 | up |
| P16 | up |
| P17 | up |
| P18 | up |
| P19 | up |
| P20 | up |
| P21 | up |
| P22 | up |
| P23 | up |
| P24 | up |
| P25 | up |
| P26 | up |
| P27 | up |
| P28 | up |

| Solution[2]: Etat_Port | | |
|------------------------|------|----|
| | Tx | Rx |
| P1 | up | up |
| P2 | up | up |
| P3 | up | up |
| P4 | down | up |
| P5 | up | up |
| P6 | up | up |
| P7 | up | up |
| P8 | up | up |
| P9 | up | up |
| P10 | up | up |
| P11 | up | up |
| P12 | up | up |
| P13 | up | up |
| P14 | up | up |
| P15 | up | up |
| P16 | up | up |
| P17 | up | up |
| P18 | up | up |
| P19 | up | up |
| P20 | up | up |
| P21 | up | up |
| P22 | up | up |
| P23 | up | up |
| P24 | up | up |
| P25 | up | up |
| P26 | up | up |
| P27 | up | up |
| P28 | up | up |

Figure 4.4 : Résultats du modèle 1 affichés par OPL

| Solution[1] | | Solution[2] | |
|------------------|-------|------------------|-------|
| Names | Data | Names | Data |
| Equipement_Panne | 2 | Equipement_Panne | 4 |
| Temps_Panne | 43200 | Temps_Panne | 43200 |

Figure 4.5 : Résultats du modèle 2 affichés par OPL

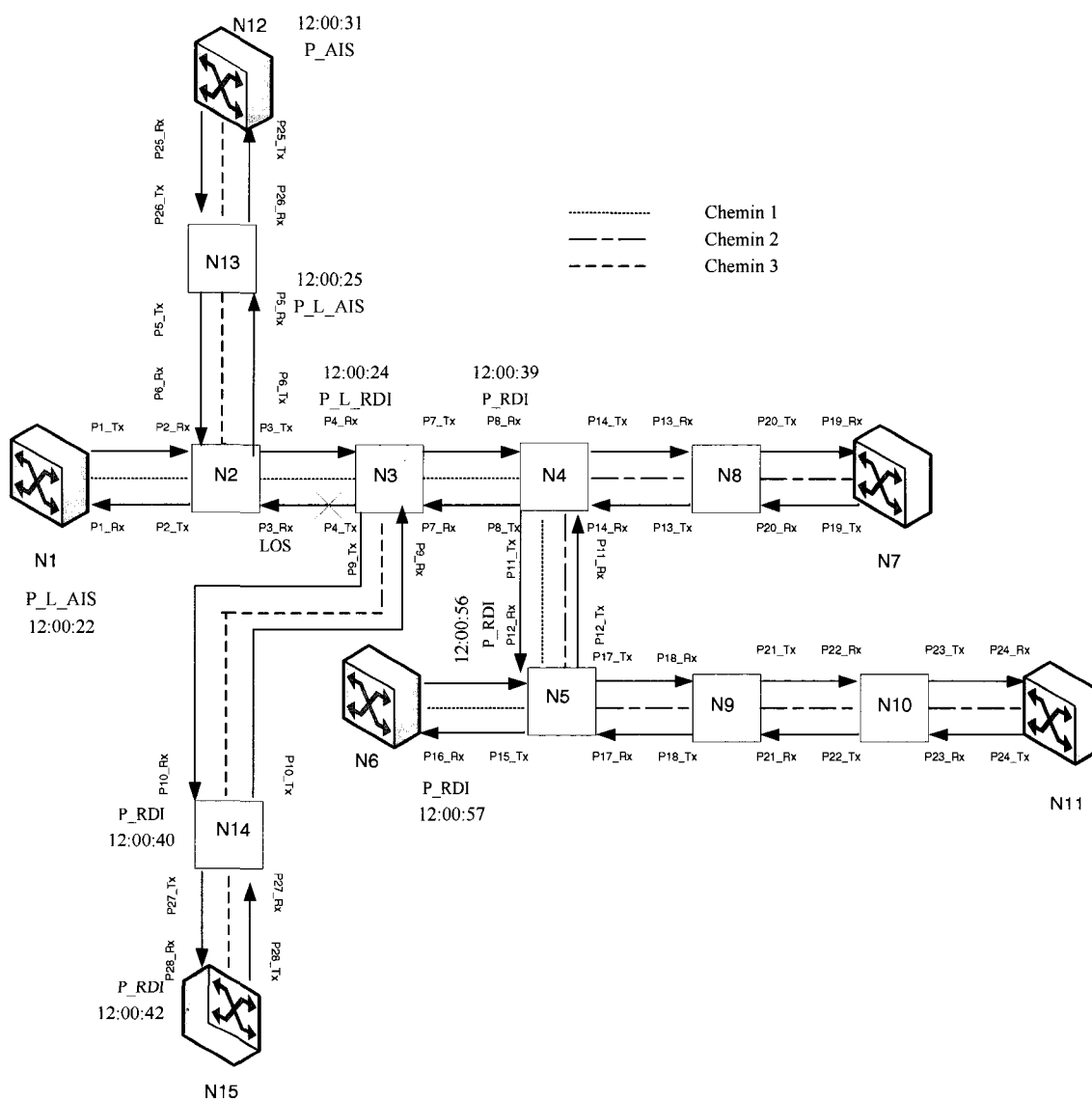


Figure 4.6 : Propagation des alarmes détaillée

Si nous nous basons sur le même réseau que celui de la figure 4.2 mais nous changeons les alarmes comme illustrées au tableau 4.6 et dans la figure 4.7. Comme vu précédemment, nous avons considéré que les ports d'un nœud i sont branchés aux cartes de type i . Si nous prenons le cas du nœud 4, les ports P11, P14 et P8 seront branchés à la carte C4. Dans cet exemple, nous avons changé la carte du nœud 4 en supposant que les ports 11 et 14 sont branchés à une autre carte différente de 4, soit 5. Le port P8 restera branché à la carte C4.

Tableau 4.6 : Table des alarmes des nœuds sources et destinations

| Ports | Types de l'alarme | Heure de l'alarme (HH :MM :SS) |
|--------|-------------------|--------------------------------|
| P1_Rx | P_AIS | 12 :00 :37 |
| P16_Rx | P_RDI | 12 :00 :48 |

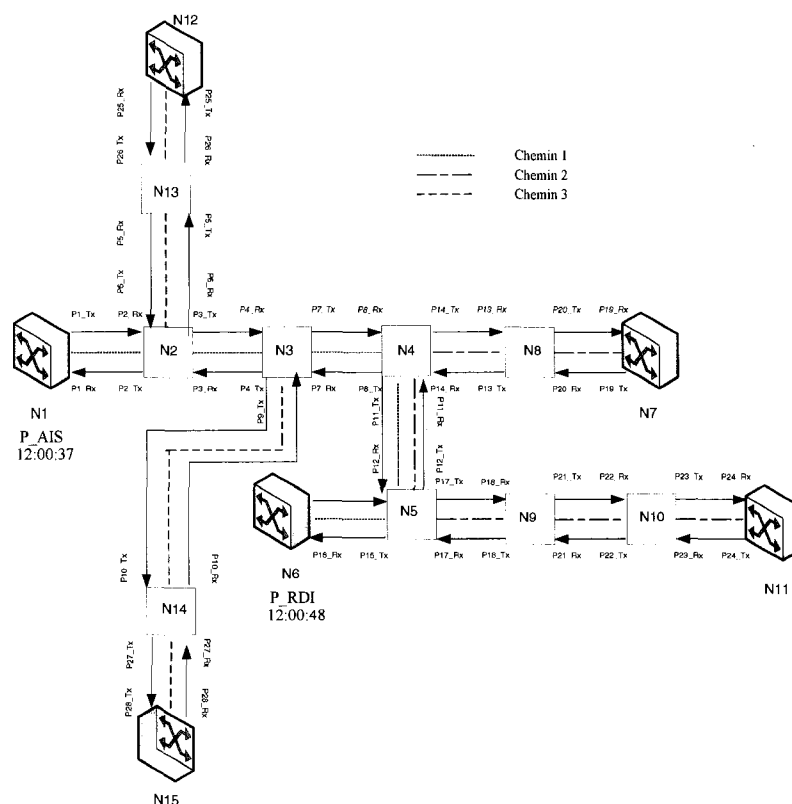


Figure 4.7 : Les alarmes que le gestionnaire de réseau reçoit

Le premier modèle OPL nous affiche alors que l'origine de la panne est soit la fibre qui est reliée au port P8 (lien 4), soit le port P8 ou la carte C4 du nœud N4 (figure 4.8). Le deuxième modèle OPL nous affiche aussi les mêmes résultats (le lien 4 ou le port P8 ou la carte C4 du nœud N4, notée par 104). Il rajoute que le temps de la panne est 12:00:00 (figure 4.9).

En effet, comme illustré à la figure 4.10, puisque nous observons des alarmes dans les nœuds N1 et N6, la panne ne peut être que sur un des liens par lesquels le chemin optique ayant N1 comme source et N6 comme destination. Nous excluons le cas où la panne est au niveau du lien 2 puisque si c'était le cas, nous aurions observé des alarmes dans les nœuds source et destination des chemins optiques passants par ce lien (le nœud N12 et N15). Si nous nous basons sur le temps de propagation, nous savons que le port 16 du nœud N6 a reçu un P_RDI à 12:00:48. Nous concluons que la panne est au niveau du lien 4, lié au port P8. Ainsi, si la panne est au niveau du port P8_Tx à 12:00:00, le P7_Rx du nœud 3 recevra alors un LOS à 12:00:15. Ce dernier enverra un P_RDI et L_RDI, noté par P_L_RDI dans la figure 4.10, au P8_Rx du nœud N4 à 12:00:30. Le nœud N5 recevra un P_RDI à 12:00:47, au port P12_Rx et enfin, le nœud N6 recevra au port P16_Rx un P_RDI à 12:00:48. Avec le même raisonnement, le P1_Rx recevra un P_AIS et L_AIS, noté par P_L_AIS dans la figure 4.10, à 12:00:37.

Nous constatons aussi que OPL nous affiche que la panne peut être aussi au niveau de la carte 4 du nœud 4 (figure 4.8). En effet, si la carte C4 est en panne, les ports qui lui sont reliés seront en panne. Dans notre cas, il s'agit du port P8 et ce qui appuie la concordance des résultats trouvés par OPL.

Nous n'observons pas de panne au niveau du nœud N4 puisque tous les ports, qui lui sont reliés, ne sont pas en panne.

| Solution[1]: Etat_Fibre | |
|-------------------------|------|
| Indices | Data |
| P1 | up |
| P2 | up |
| P3 | up |
| P4 | up |
| P5 | up |
| P6 | up |
| P7 | up |
| P8 | down |
| P9 | up |
| P10 | up |
| P11 | up |
| P12 | up |
| P13 | up |
| P14 | up |
| P15 | up |
| P16 | up |
| P17 | up |
| P18 | up |
| P19 | up |
| P20 | up |
| P21 | up |
| P22 | up |
| P23 | up |
| P24 | up |
| P25 | up |
| P26 | up |
| P27 | up |
| P28 | up |

| Solution[2]: Etat_Port | | |
|------------------------|------|----|
| | Tx | Rx |
| P1 | up | up |
| P2 | up | up |
| P3 | up | up |
| P4 | up | up |
| P5 | up | up |
| P6 | up | up |
| P7 | up | up |
| P8 | down | up |
| P9 | up | up |
| P10 | up | up |
| P11 | up | up |
| P12 | up | up |
| P13 | up | up |
| P14 | up | up |
| P15 | up | up |
| P16 | up | up |
| P17 | up | up |
| P18 | up | up |
| P19 | up | up |
| P20 | up | up |
| P21 | up | up |
| P22 | up | up |
| P23 | up | up |
| P24 | up | up |
| P25 | up | up |
| P26 | up | up |
| P27 | up | up |
| P28 | up | up |

| Solution[3]: Etat_Carte | |
|-------------------------|------|
| Indices | Data |
| C1 | up |
| C2 | up |
| C3 | up |
| C4 | down |
| C5 | up |
| C6 | up |
| C7 | up |
| C8 | up |
| C9 | up |
| C10 | up |
| C11 | up |
| C12 | up |
| C13 | up |
| C14 | up |
| C15 | up |

Figure 4.8 : Résultats du modèle 1 affichés par OPL

| Solution[1] | | Solution[2] | |
|------------------|-------|------------------|-------|
| Names | Data | Names | Data |
| Equipement_Panne | 4 | Equipement_Panne | 8 |
| Temps_Panne | 43200 | Temps_Panne | 43200 |

| Solution[3] | |
|------------------|-------|
| Names | Data |
| Equipement_Panne | 104 |
| Temps_Panne | 43200 |

Figure 4.9 : Résultats du modèle 2 affichés par OPL

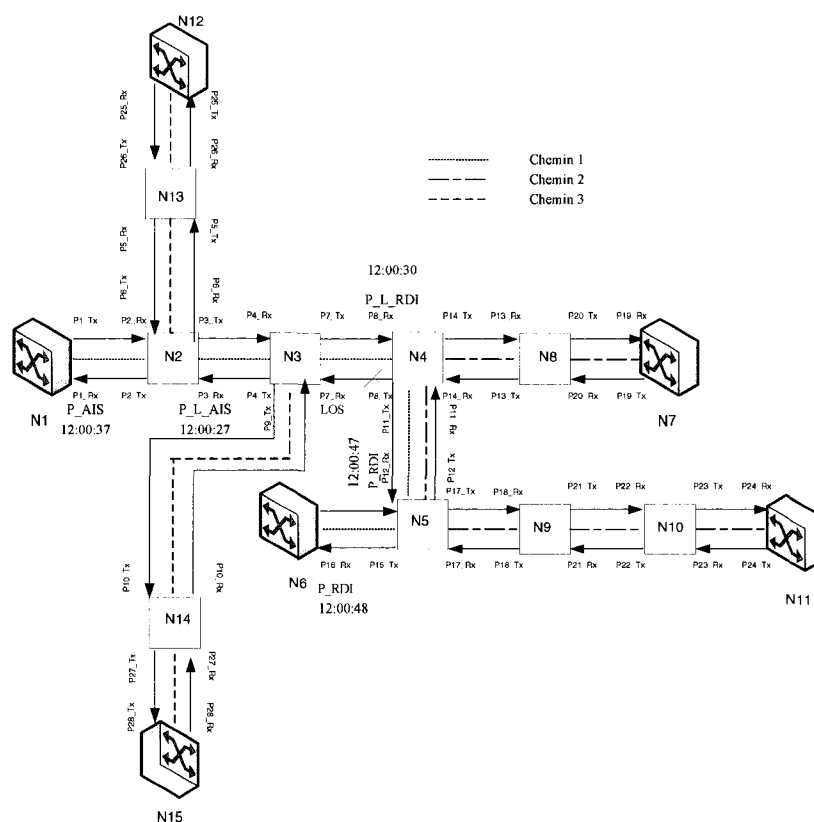


Figure 4.10 : Propagation des alarmes détaillée

En prenant le même réseau de la figure 4.1 mais en changeant les nœuds de sources et de destinations des 3 chemins optiques comme illustré au tableau 4.7 et à la figure 4.11, la première partie de l'algorithme du générateur d'alarmes nous affiche tout d'abord les nœuds et les liens, par lesquels les chemins optiques passent, qui sont

illustrés respectivement aux tableaux 4.8 et 4.9. Si nous avons la table d'alarmes comme illustrée à la figure 4.12, le premier modèle nous affiche alors que la panne est au niveau du port 7 ou au niveau de la fibre (lien 4) liée au port 7 (figure 4.13). Le deuxième modèle OPL nous affiche les mêmes résultats et il ajoute que le temps de la panne est au temps 12:00:00 (figure 4.14). En effet, nous observons des alarmes dans les nœuds N1, N11, N12, N6, N7 et N15. Ce qui implique que la panne est au niveau des liens en commun passants par ces nœuds (lien4). En plus, si nous nous basons sur les délais de propagation, nous constatons que la panne est au niveau du port 7 du lien 4. Le cas des pannes aux niveaux de C3 et N3 n'est pas considéré puisqu'il n'y aura pas de concordance avec les résultats donnés par OPL. Les détails des temps de propagation des alarmes sont illustrés à la figure 4.15.

Tableau 4.7 : Les chemins optiques

| Chemins optiques | Nœud source | Nœud destination |
|------------------|-------------|------------------|
| 1 | N1 | N11 |
| 2 | N15 | N7 |
| 3 | N12 | N6 |

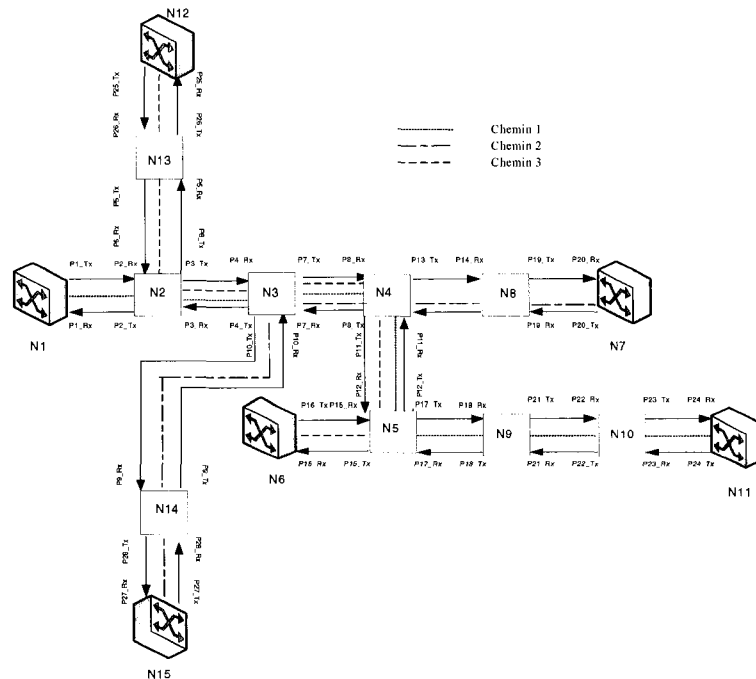


Figure 4.11 : Réseau avec les trois chemins optiques

Tableau 4.8 : Les nœuds des chemins optiques

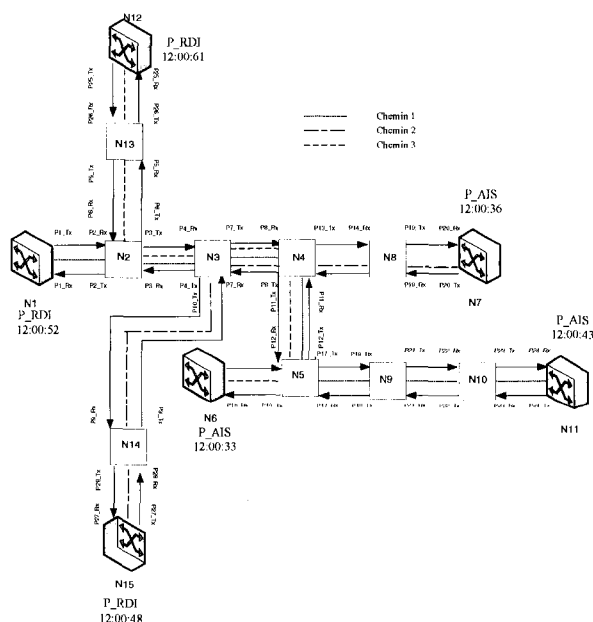
| Chemins optiques | Liste des nœuds passant par le chemin optique |
|------------------|---|
| 1 | N1-N2-N3-N4-N5-N9-N10-N11 |
| 2 | N7-N8-N4-N3-N14-N15 |
| 3 | N12-N13- N2-N3-N4-N5-N6 |

Tableau 4.9 : Les liens des chemins optiques

| Chemins optiques | Liens |
|------------------|-----------------------------|
| 1 | 1 – 2 – 4 – 6 – 9 – 11 – 12 |
| 2 | 10 – 7 – 4 – 5 – 14 |
| 3 | 13 – 3 – 2 – 4 – 6 – 8 |

Tableau 4.10 : Table des alarmes des nœuds sources et destinations

| Ports | Types de l'alarme | Heure de l'alarme (HH :MM :SS) |
|--------|-------------------|--------------------------------|
| P1_Rx | P_RDI | 12 :00 :52 |
| P24_Rx | P_AIS | 12 :00 :43 |
| P20_Rx | P_AIS | 12 :00 :36 |
| P27_Rx | P_RDI | 12 :00 :48 |
| P25_Rx | P_RDI | 12 :00 :61 |
| P16_Rx | P_AIS | 12 :00 :33 |

**Figure 4.12 : Les alarmes que le gestionnaire de réseau reçoit**

| Solution[1]: Etat_Fibre | | Solution[2]: Etat_Port | | |
|-------------------------|------|------------------------|------|----|
| Indices | Data | | Tx | Rx |
| P1 | up | P1 | up | up |
| P2 | up | P2 | up | up |
| P3 | up | P3 | up | up |
| P4 | up | P4 | up | up |
| P5 | up | P5 | up | up |
| P6 | up | P6 | up | up |
| P7 | down | P7 | down | up |
| P8 | up | P8 | up | up |
| P9 | up | P9 | up | up |
| P10 | up | P10 | up | up |
| P11 | up | P11 | up | up |
| P12 | up | P12 | up | up |
| P13 | up | P13 | up | up |
| P14 | up | P14 | up | up |
| P15 | up | P15 | up | up |
| P16 | up | P16 | up | up |
| P17 | up | P17 | up | up |
| P18 | up | P18 | up | up |
| P19 | up | P19 | up | up |
| P20 | up | P20 | up | up |
| P21 | up | P21 | up | up |
| P22 | up | P22 | up | up |
| P23 | up | P23 | up | up |
| P24 | up | P24 | up | up |
| P25 | up | P25 | up | up |
| P26 | up | P26 | up | up |
| P27 | up | P27 | up | up |
| P28 | up | P28 | up | up |

Figure 4.13 : Résultats du modèle 1 affichés par OPL

| Solution[1] | | Solution[2] | |
|------------------|-------|------------------|-------|
| Names | Data | Names | Data |
| Equipement_Panne | 4 | Equipement_Panne | 7 |
| Temps_Panne | 43200 | Temps_Panne | 43200 |

Figure 4.14 : Résultats du modèle 2 affichés par OPL

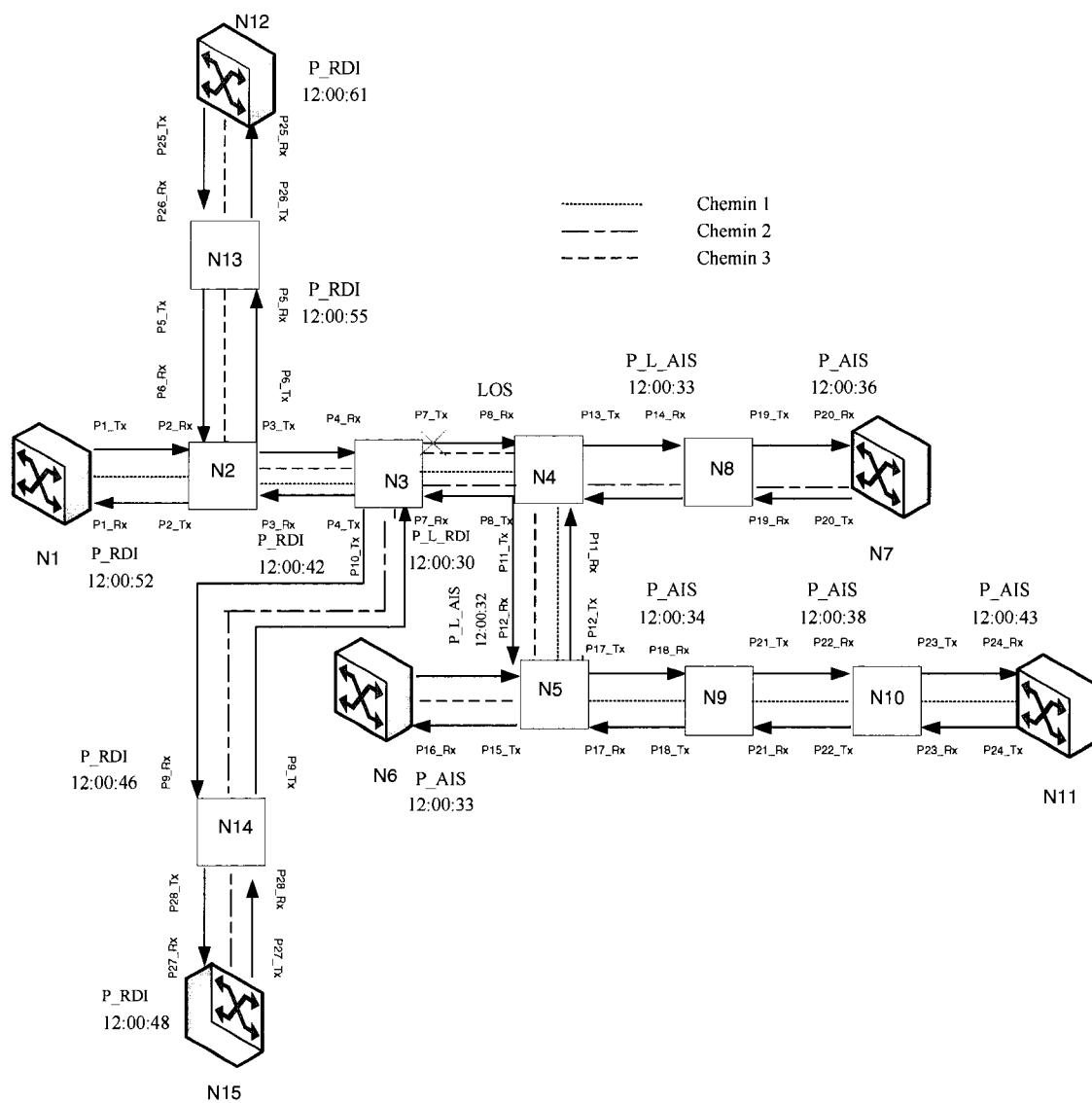


Figure 4.15 : Propagation des alarmes détaillée

Dans l'exemple suivant, nous augmenterons le nombre de nœuds dans le réseau. Ainsi, nous avons 48 nœuds dont les liens sont illustrés au tableau 4.11. En se basant sur ces données, nous obtenons le réseau qui est illustré à la figure 4.16.

Supposons que nous ayons 3 chemins optiques dans ce réseau, comme illustré à la figure 4.17, dont les nœuds sources et de destinations sont présentés dans le tableau 4.12. La première partie de l'algorithme du générateur d'alarmes nous affichent tout d'abord les nœuds et les liens, par lesquels les chemins optiques passent, qui sont illustrés respectivement au tableau 4.13 et 4.14.

Tableau 4.11 : Données de l'exemple 3

| Noeud 1 | Noeud 2 | Distance |
|---------|---------|----------|
| 1 | 2 | 10 |
| 2 | 3 | 9 |
| 2 | 9 | 8 |
| 2 | 10 | 7 |
| 3 | 4 | 6 |
| 3 | 47 | 6 |
| 4 | 5 | 5 |
| 4 | 14 | 4 |
| 5 | 6 | 3 |
| 5 | 48 | 3 |
| 6 | 7 | 2 |
| 6 | 18 | 1 |
| 7 | 22 | 10 |
| 8 | 9 | 9 |
| 10 | 11 | 8 |
| 11 | 12 | 7 |
| 12 | 13 | 6 |
| 12 | 37 | 6 |
| 14 | 15 | 5 |
| 15 | 16 | 4 |
| 16 | 17 | 3 |
| 18 | 19 | 2 |
| 19 | 20 | 1 |
| 20 | 21 | 10 |
| 22 | 23 | 9 |
| 23 | 24 | 8 |
| 23 | 25 | 8 |
| 25 | 26 | 7 |

| | | |
|----|----|----|
| 26 | 27 | 6 |
| 26 | 41 | 6 |
| 27 | 28 | 5 |
| 28 | 29 | 5 |
| 28 | 31 | 3 |
| 29 | 30 | 4 |
| 31 | 32 | 2 |
| 32 | 33 | 1 |
| 33 | 34 | 10 |
| 34 | 35 | 9 |
| 35 | 36 | 8 |
| 37 | 38 | 7 |
| 38 | 39 | 6 |
| 39 | 40 | 5 |
| 41 | 42 | 3 |
| 42 | 43 | 3 |
| 43 | 44 | 2 |
| 44 | 45 | 1 |
| 45 | 46 | 10 |

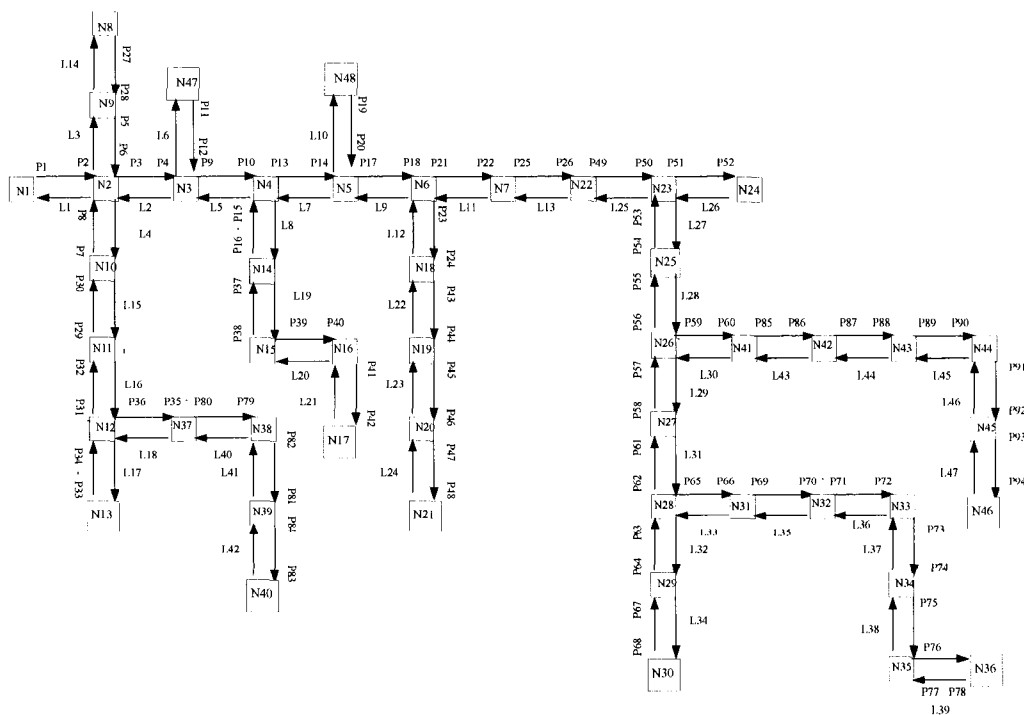


Figure 4.16 : Réseau obtenu du troisième exemple

Tableau 4.12 : Les chemins optiques

| Chemins optiques | Nœud source | Nœud destination |
|------------------|-------------|------------------|
| 1 | N1 | N30 |
| 2 | N40 | N24 |
| 3 | N47 | N36 |

Tableau 4.13 : Les nœuds des chemins optiques

| Chemins optiques | Liste des nœuds passant par le chemin optique |
|------------------|--|
| 1 | N1-N2-N3-N4-N5-N6-N7-N22- N23- N25- N26- N27- N28- N29- N30 |
| 2 | N40-N39-N38-N37-N12-N11-N10-N2-N3-N4-N5-N6-N7-N22-N23- N24 |
| 3 | N47-N3- N4-N5-N6-N7-N22- N23- N25- N26- N27- N28- N31- N32- N33- N34- N35- N36 |

Tableau 4.14 : Les liens des chemins optiques

| Chemins optiques | Liens |
|------------------|--|
| 1 | 1 – 2 – 5 – 7 – 9 – 11 – 13 – 25 – 27 – 28 – 29 – 31 – 32 – 34 |
| 2 | 42 – 41 – 40 – 18 – 16 – 15 – 4 – 2 – 5 – 7 – 9 – 11 – 13 – 25 – 26 |
| 3 | 6 – 5 – 7 – 9 – 11 – 13 – 25 – 27 – 28 – 29 – 31 – 33 – 35 – 36 – 37 – 38 – 39 |

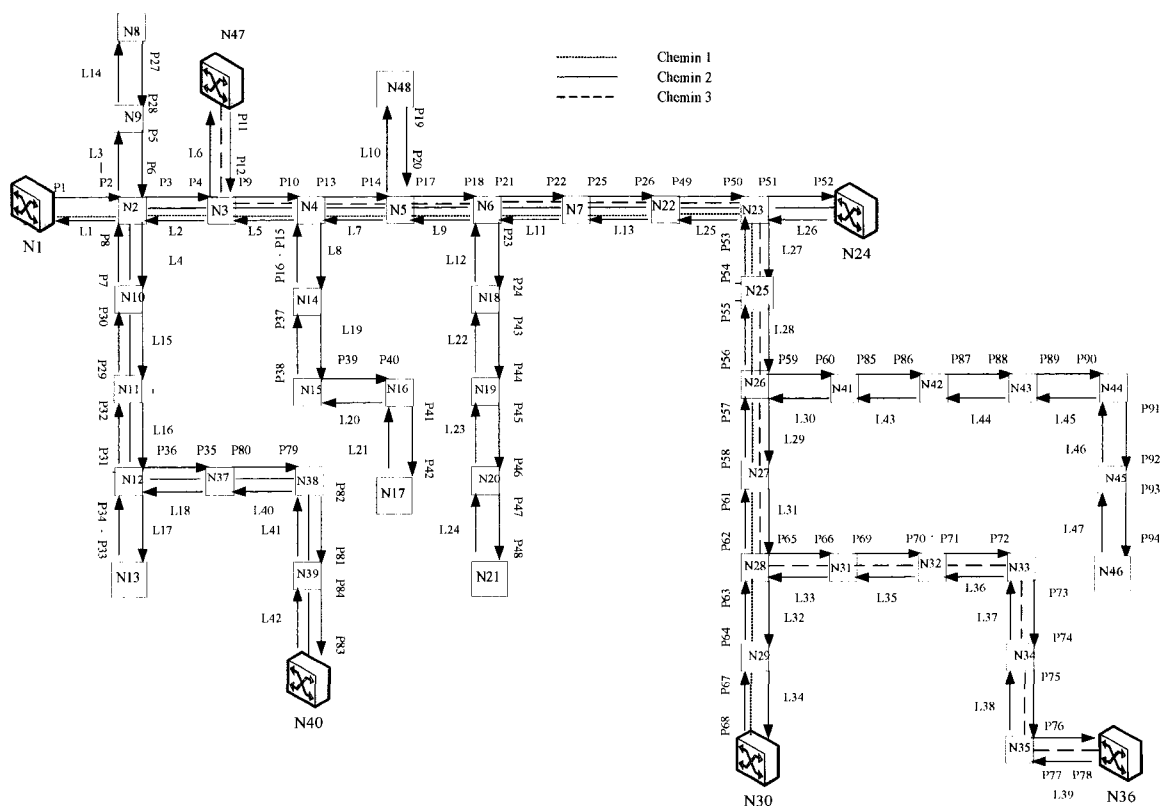


Figure 4.17 : Réseau avec les trois chemins optiques

La deuxième étape de notre procédure nous permet de générer différentes pannes simples dans le réseau. Si par exemple, nous générons la table suivante des alarmes (tableau 4.15 et figure 4.18), le premier modèle OPL nous affiche alors, dans un délai de 0.04 sec, que la panne est au niveau du port 9 ou au niveau de la fibre (lien L5) liée au port 9 (nous avons présenté que la panne au niveau du port 9 dans la figure 4.19). Le deuxième modèle OPL nous affiche les mêmes résultats mais il rajoute que le temps de la panne est 12:00:00 (figure 4.20). En effet, puisque nous observons des alarmes aux nœuds N1, N30, N40, N24, N47 et N36, la panne ne peut être que dans les liens en commun des trois chemins optiques passant par ces nœuds (liens 2, 5, 7, 9, 11, 13 ou 25). En outre, en se basant sur les délais de propagation des alarmes qui sont illustrés à la figure 4.21, nous concluons que la panne est au niveau du port 9 du lien 5. Le cas des pannes aux niveaux de C3 et N3 n'est pas considéré puisqu'il n'y aura pas de concordance avec les résultats donnés par OPL.

Tableau 4.15 : Table des alarmes des nœuds sources et destinations

| Ports | Types de l'alarme | Heure de l'alarme (HH :MM :SS) |
|--------|-------------------|--------------------------------|
| P1_Rx | P_RDI | 12 :00 : 31 |
| P68_Rx | P_AIS | 12 :00 : 70 |
| P83_Rx | P_RDI | 12 :00 : 67 |
| P52_Rx | P_AIS | 12 :00 : 43 |
| P11_Rx | P_RDI | 12 :00 : 18 |
| P78_Rx | P_AIS | 12 :00 : 94 |

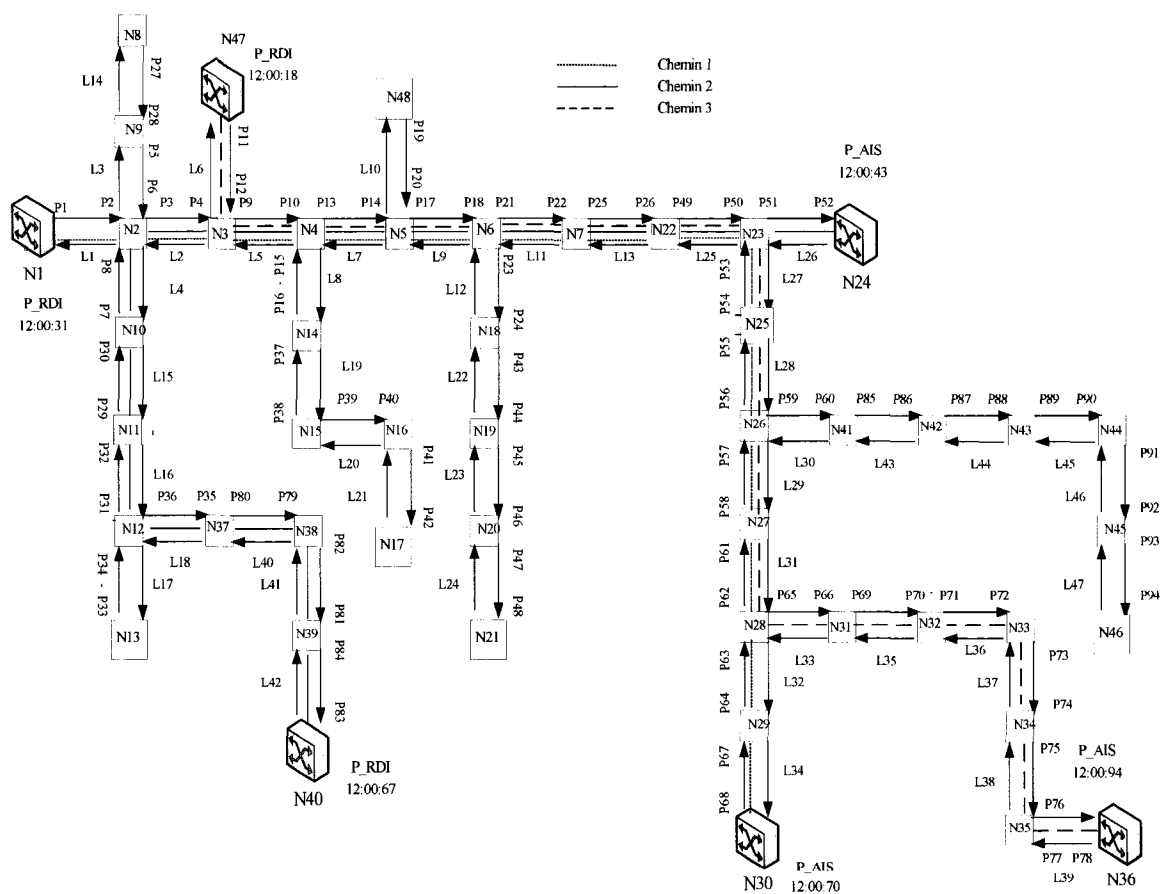


Figure 4.18 : Les alarmes que le gestionnaire de réseau reçoit

| Solution[2]: Etat_Port | | | | | | | | | | |
|------------------------|------|----|--|-----|----|----|--|-----|----|----|
| | Tx | Rx | | | Tx | Rx | | Tx | Rx | |
| P1 | up | up | | P31 | up | up | | P61 | up | up |
| P2 | up | up | | P32 | up | up | | P62 | up | up |
| P3 | up | up | | P33 | up | up | | P63 | up | up |
| P4 | up | up | | P34 | up | up | | P64 | up | up |
| P5 | up | up | | P35 | up | up | | P65 | up | up |
| P6 | up | up | | P36 | up | up | | P66 | up | up |
| P7 | up | up | | P37 | up | up | | P67 | up | up |
| P8 | up | up | | P38 | up | up | | P68 | up | up |
| P9 | down | up | | P39 | up | up | | P69 | up | up |
| P10 | up | up | | P40 | up | up | | P70 | up | up |
| P11 | up | up | | P41 | up | up | | P71 | up | up |
| P12 | up | up | | P42 | up | up | | P72 | up | up |
| P13 | up | up | | P43 | up | up | | P73 | up | up |
| P14 | up | up | | P44 | up | up | | P74 | up | up |
| P15 | up | up | | P45 | up | up | | P75 | up | up |
| P16 | up | up | | P46 | up | up | | P76 | up | up |
| P17 | up | up | | P47 | up | up | | P77 | up | up |
| P18 | up | up | | P48 | up | up | | P78 | up | up |
| P19 | up | up | | P49 | up | up | | P79 | up | up |
| P20 | up | up | | P50 | up | up | | P80 | up | up |
| P21 | up | up | | P51 | up | up | | P81 | up | up |
| P22 | up | up | | P52 | up | up | | P82 | up | up |
| P23 | up | up | | P53 | up | up | | P83 | up | up |
| P24 | up | up | | P54 | up | up | | P84 | up | up |
| P25 | up | up | | P55 | up | up | | | | |
| P26 | up | up | | P56 | up | up | | | | |
| P27 | up | up | | P57 | up | up | | | | |
| P28 | up | up | | P58 | up | up | | | | |
| P29 | up | up | | P59 | up | up | | | | |
| P30 | up | up | | P60 | up | up | | | | |

Figure 4.19 : Résultats du modèle 1 affichés par OPL

| Solution[1] | | | Solution[2] | | |
|------------------|--|-------|------------------|--|-------|
| Names | | Data | Names | | Data |
| Equipement_Panne | | 5 | Equipement_Panne | | 9 |
| Temps_Panne | | 43200 | Temps_Panne | | 43200 |

Figure 4.20 : Résultats du modèle 2 affichés par OPL

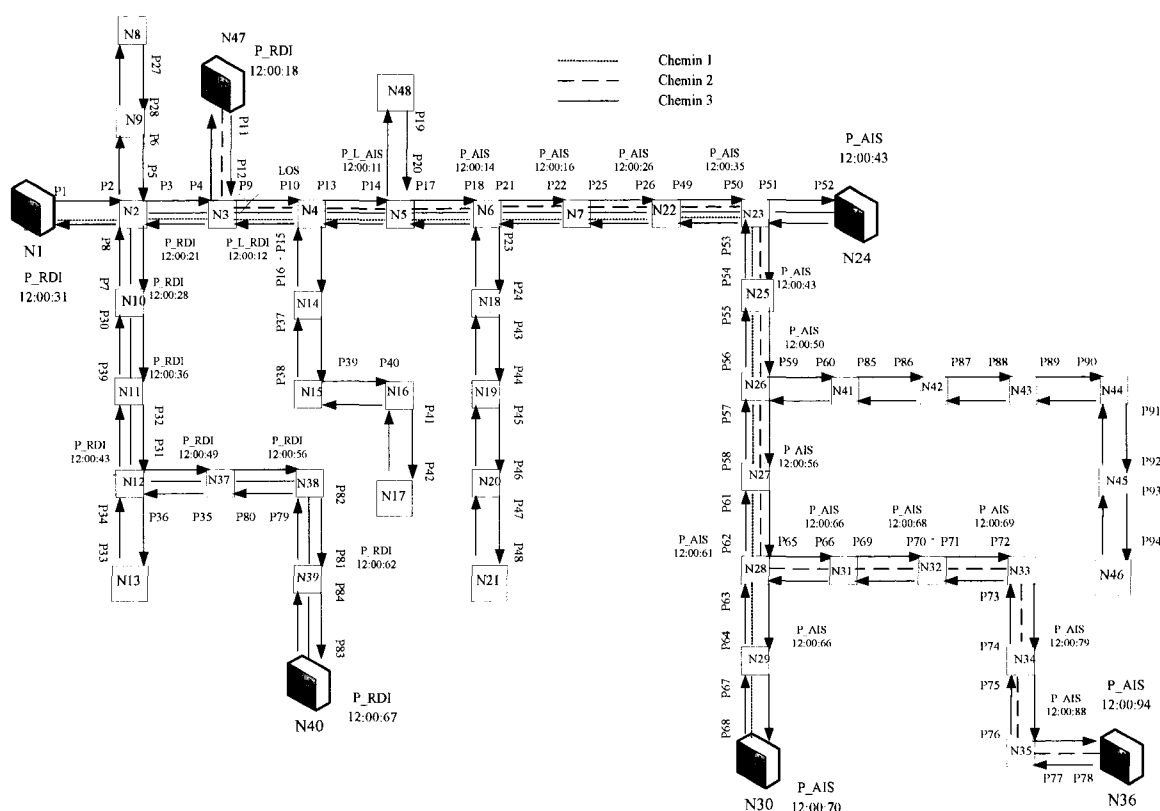


Figure 4.21 : Propagation des alarmes détaillée

En prenant le même réseau de la figure 4.16 mais en augmentant le nombre de chemins optiques comme illustré au tableau 4.16 et dans la figure 4.22, le générateur d'alarmes nous affiche tout d'abord les nœuds et les liens, par lesquels les chemins optiques passent, qui sont illustrés respectivement aux tableaux 4.17 et 4.18. Si nous avons la table d'alarmes comme illustrée au tableau 4.19 et qui sont présentées dans la figure 4.23, le premier modèle OPL nous affiche alors, dans un délai de 0.05 secondes, que la panne est au niveau du port 17 ou au niveau de la fibre (lien L9) liée au port 17 (nous avons affiché que la panne au niveau du port 17 dans la figure 4.24). Le deuxième modèle OPL nous affiche, dans un délai de 0.05 sec, les mêmes résultats. Il

rajoute que le temps de la panne est 12:00:00 (figure 4.25). En effet, puisque nous observons des alarmes aux nœuds N1, N30, N8, N24, N48, N36, N40, N46, N13 et N21, la panne ne peut être que dans les liens en commun des cinq chemins optiques passant par ces nœuds (liens 9). De plus, en se basant sur les délais de propagation des alarmes qui sont illustrés à la figure 4.26, nous concluons que la panne est au niveau du port 17 du lien 9. Le cas des pannes aux niveaux de C5 et N5 n'est pas considéré puisqu'il n'y aura pas de concordance avec les résultats donnés par OPL.

Tableau 4.16 : Les chemins optiques

| Chemins optiques | Nœud source | Nœud destination |
|------------------|-------------|------------------|
| 1 | N1 | N30 |
| 2 | N8 | N24 |
| 3 | N48 | N36 |
| 4 | N40 | N46 |
| 5 | N13 | N21 |

Tableau 4.17 : Les nœuds des chemins optiques

| Chemins optiques | Liste des nœuds passant par le chemin optique |
|------------------|---|
| 1 | N1-N2-N3-N4-N5-N6-N7-N22- N23- N25- N26- N27- N28- N29- N30 |
| 2 | N8-N9- N2-N3-N4-N5-N6-N7-N22- N23- N24 |
| 3 | N48-N5-N6-N7-N22-N23- N25- N26- N27- N28-N31- N32- N33- N34- N35- N36 |
| 4 | N40-N39-N38-N37-N12-N11-N10-N2-N3-N4-N5-N6-N7-N22-N23- N25- N26- N41- N42-N43-N44-N45-N46 |
| 5 | N13-N12- N11-N10-N2-N3-N4-N5-N6-N18-N19-N20-N21 |

Tableau 4.18 : Les liens des chemins optiques

| Chemins optiques | Liens |
|------------------|--|
| 1 | 1 – 2 – 5 – 7 – 9 – 11 – 13 – 25 – 27 – 28 – 29 – 31 – 32 – 34 |
| 2 | 14 – 3 – 2 – 5 – 7 – 9 – 11 – 13 – 25 – 26 |
| 3 | 10 – 9 – 11 – 13 – 25 – 27 – 28 – 29 – 31 – 33 – 35 – 36 – 37 – 38 – 39 |
| 4 | 42 – 41 – 40 – 18 – 16 – 15 – 4 – 2 – 5 – 7 – 9 – 11 – 13 – 25 – 27 – 28 – 30 – 43 – 44 – 45 – 46 – 47 |
| 5 | 17 – 16 – 15 – 4 – 2 – 5 – 7 – 9 – 12 – 22 – 23 – 24 |

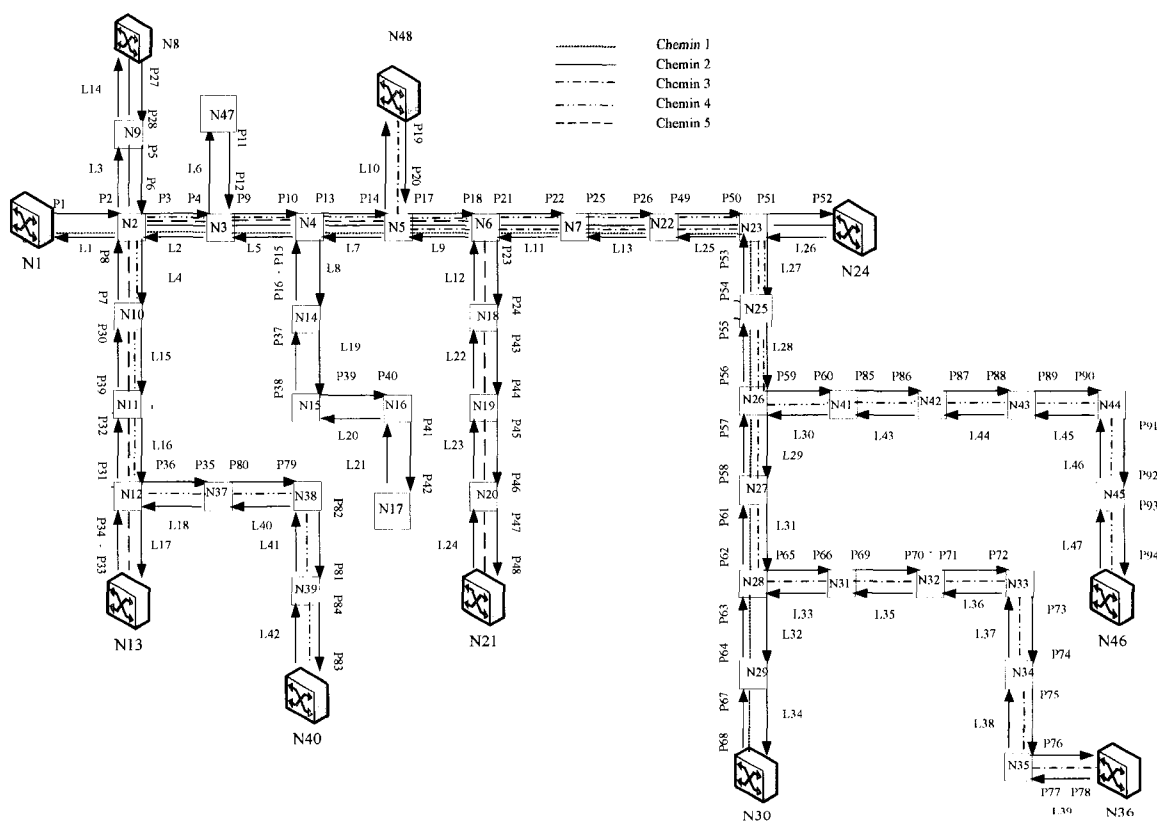


Figure 4.22 : Réseau obtenu

Tableau 4.19 : Table des alarmes des nœuds sources et destinations

| Ports | Types de l'alarme | Heure de l'alarme (HH :MM :SS) |
|--------|-------------------|--------------------------------|
| P1_Rx | P_RDI | 12 :00 : 36 |
| P68_Rx | P_AIS | 12 :00 : 59 |
| P27_Rx | P_RDI | 12 :00 : 43 |
| P52_Rx | P_AIS | 12 :00 : 32 |
| P19_Rx | P_RDI | 12 :00 : 09 |
| P78_Rx | P_AIS | 12 :00 : 83 |
| P83_Rx | P_RDI | 12 :00 : 72 |
| P94_Rx | P_AIS | 12 :00 : 65 |
| P33_Rx | P_RDI | 12 :00 : 54 |
| P48_Rx | P_AIS | 12 :00 : 17 |

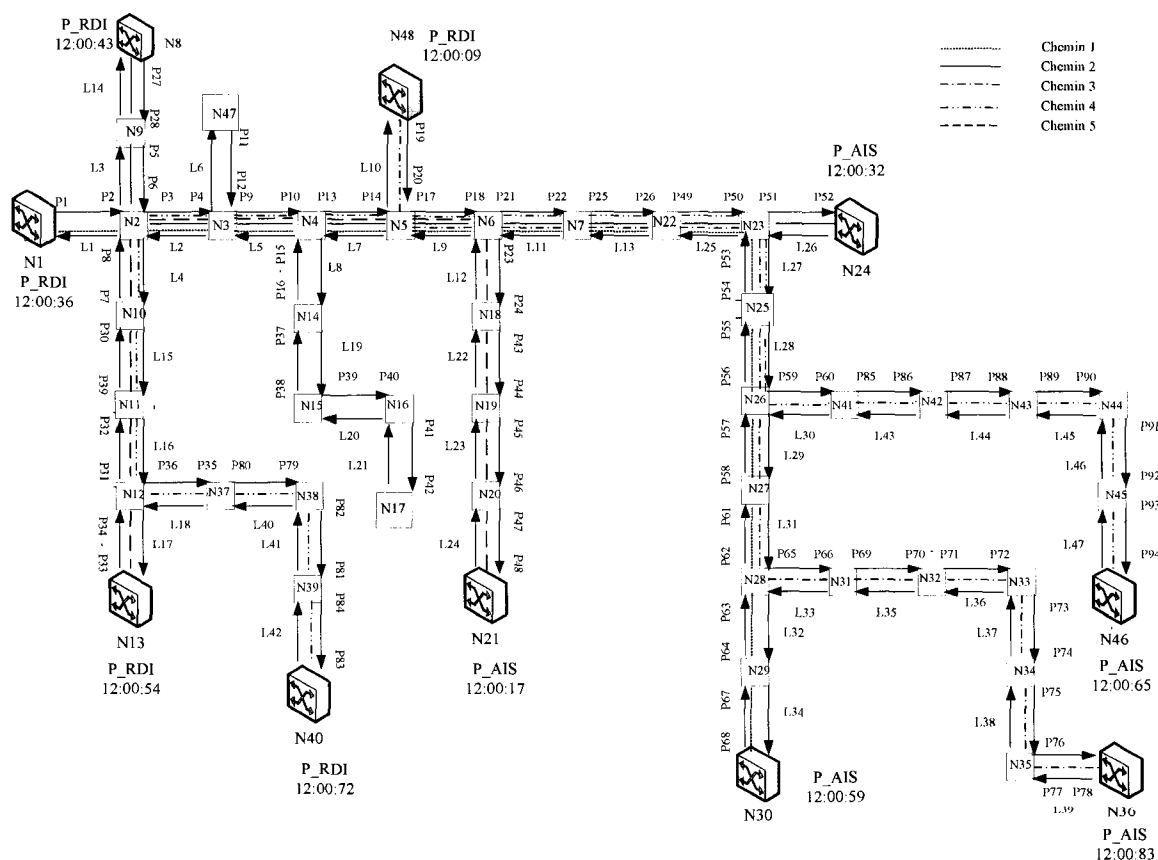


Figure 4.23 : Les alarmes que le gestionnaire de réseau reçoit

| Solution[2]: Etat_Port | | | | | | | | |
|------------------------|------|----|-----|----|----|-----|----|----|
| | Tx | Rx | | Tx | Rx | | Tx | Rx |
| P1 | up | up | P39 | up | up | P76 | up | up |
| P2 | up | up | P40 | up | up | P77 | up | up |
| P3 | up | up | P41 | up | up | P78 | up | up |
| P4 | up | up | P42 | up | up | P79 | up | up |
| P5 | up | up | P43 | up | up | P80 | up | up |
| P6 | up | up | P44 | up | up | P81 | up | up |
| P7 | up | up | P45 | up | up | P82 | up | up |
| P8 | up | up | P46 | up | up | P83 | up | up |
| P9 | up | up | P47 | up | up | P84 | up | up |
| P10 | up | up | P48 | up | up | P85 | up | up |
| P11 | up | up | P49 | up | up | P86 | up | up |
| P12 | up | up | P50 | up | up | P87 | up | up |
| P13 | up | up | P51 | up | up | P88 | up | up |
| P14 | up | up | P52 | up | up | P89 | up | up |
| P15 | up | up | P53 | up | up | P90 | up | up |
| P16 | up | up | P54 | up | up | P91 | up | up |
| P17 | down | up | P55 | up | up | P92 | up | up |
| P18 | up | up | P56 | up | up | P93 | up | up |
| P19 | up | up | P57 | up | up | P94 | up | up |
| P20 | up | up | P58 | up | up | | | |
| P21 | up | up | P59 | up | up | | | |
| P22 | up | up | P60 | up | up | | | |
| P23 | up | up | P61 | up | up | | | |
| P24 | up | up | P62 | up | up | | | |
| P25 | up | up | P63 | up | up | | | |
| P26 | up | up | P64 | up | up | | | |
| P27 | up | up | P65 | up | up | | | |
| P28 | up | up | P66 | up | up | | | |
| P29 | up | up | P67 | up | up | | | |
| P30 | up | up | P68 | up | up | | | |
| P31 | up | up | P69 | up | up | | | |
| P32 | up | up | P70 | up | up | | | |
| P33 | up | up | P71 | up | up | | | |
| P34 | up | up | P72 | up | up | | | |
| P35 | up | up | P73 | up | up | | | |
| P36 | up | up | P74 | up | up | | | |
| P37 | up | up | P75 | up | up | | | |
| P38 | up | up | | | | | | |

Figure 4.24 : Résultats du modèle 1 affichés par OPL

| Solution[1] | | Solution[2] | |
|------------------|-------|------------------|-------|
| Names | Data | Names | Data |
| Equipement_Panne | 9 | Equipement_Panne | 17 |
| Temps_Panne | 43200 | Temps_Panne | 43200 |

Figure 4.25 : Résultats du modèle 2 affichés par OPL

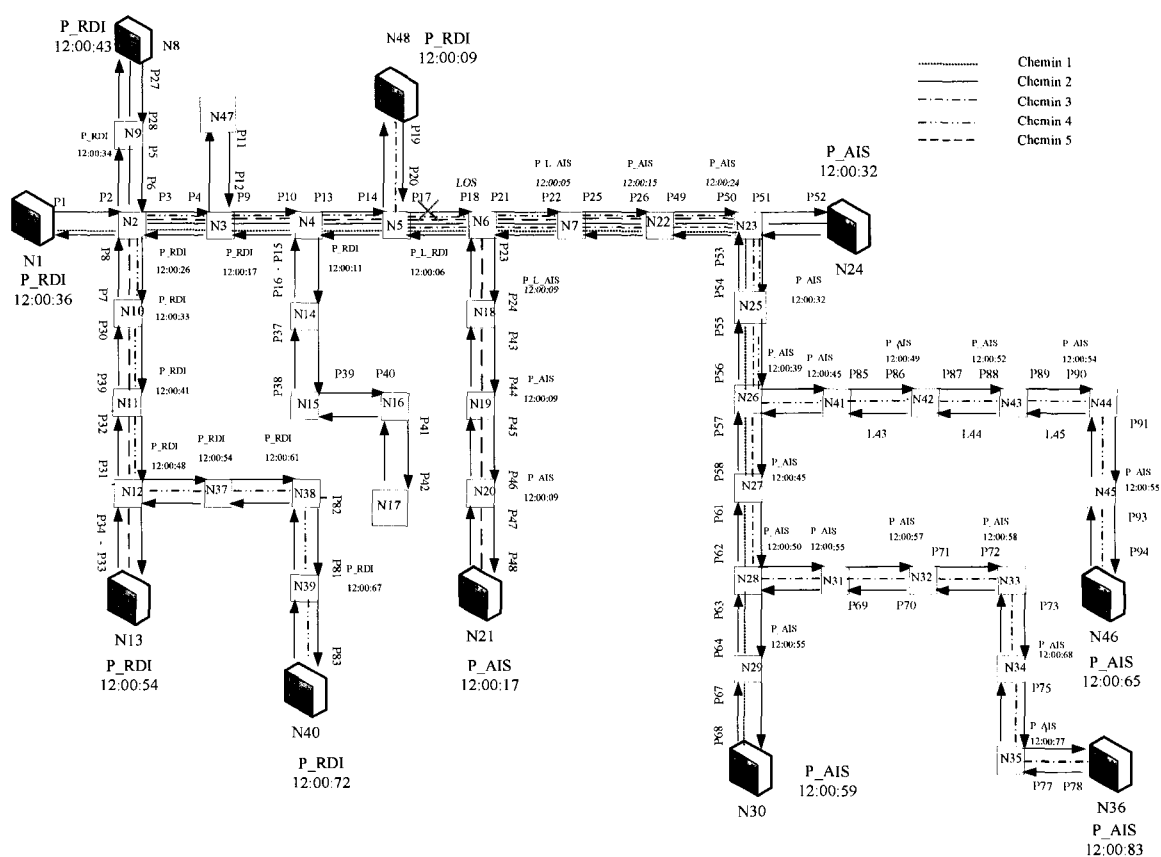


Figure 4.26 : Propagation des alarmes détaillée

Il faut que noter que nos modèles fonctionnent aussi pour les autres topologies de réseaux telles que les réseaux avec des cycles. Considérons le réseau suivant ayant 12 nœuds dont la topologie est illustrée à la figure 4.27. Supposons que nous ayons trois chemins optiques, ayant les nœuds sources et destinations représentés dans le tableau 4.20 et que nous ayons la matrice d'alarmes du tableau 4.21 (voir aussi figure 4.28).

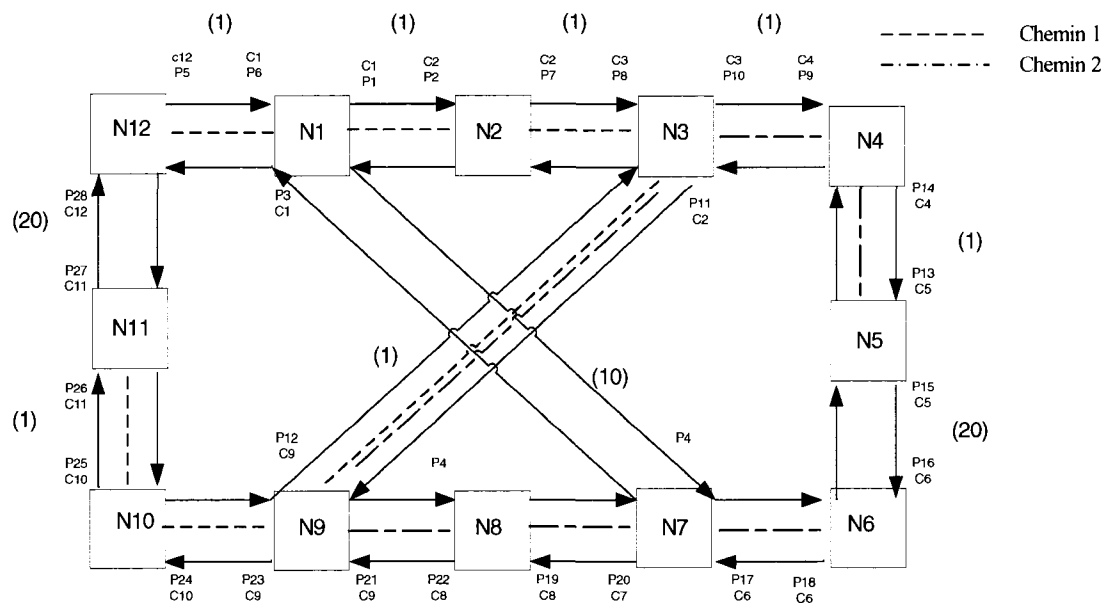


Figure 4.27 : Topologie du réseau

Tableau 4.20 : Les chemins optiques

| Chemins optiques | Nœud source | Nœud destination |
|------------------|-------------|------------------|
| 1 | N12 | N11 |
| 2 | N5 | N6 |

Tableau 4.21 : Table des alarmes des nœuds sources et destinations

| Ports | Types de l'alarme | Heure de l'alarme (HH :MM :SS) |
|--------|-------------------|--------------------------------|
| P5_Rx | P_AIS | 13 :00 : 03 |
| P26_Rx | P_RDI | 13 :00 : 05 |
| P13_Rx | P_L AIS | 13 :00 : 02 |
| P18_Rx | P_RDI | 13 :00 : 06 |

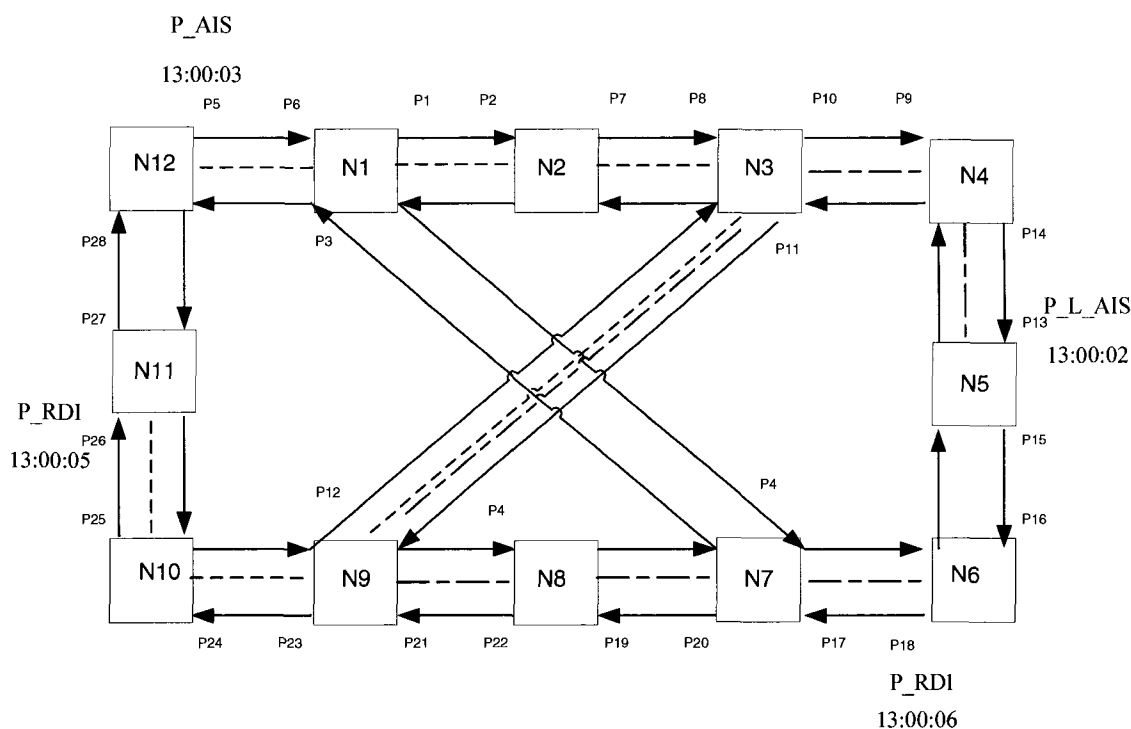
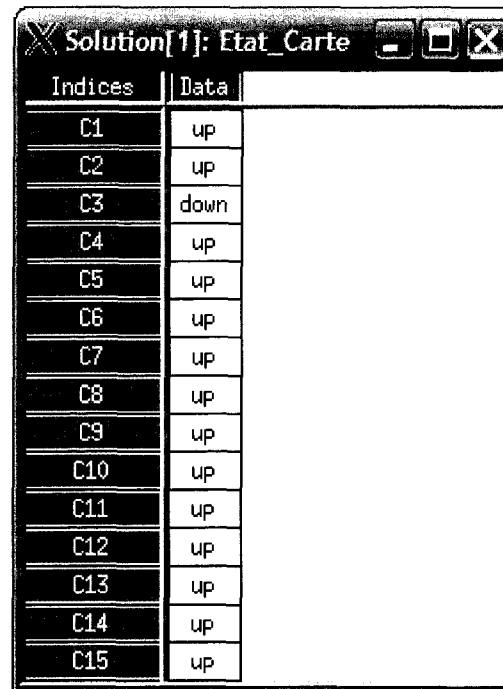


Figure 4.28 : Les alarmes que le gestionnaire de réseau reçoit

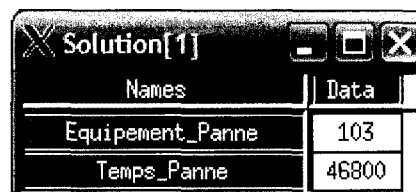
Le premier modèle OPL nous affiche alors que la panne est la carte 3 qui est reliée au nœud 3 (figure 4.29). Le deuxième modèle affiche le même résultat (carte 3 notée par 103) et rajoute que le moment de la panne est 13:00:00 (figure 4.30). En effet, en se basant sur la propagation des alarmes (figure 4.31), on en déduit que la panne est soit au niveau du port 10 (pour le chemin 1), soit au niveau du port 8 (pour le chemin 2). Il faut noter que ces deux ports sont liés à la même carte (C3). Puisque nous

travaillons dans le cas de panne simple, OPL nous affiche alors que la panne est au niveau de la carte C3 reliée au nœud 3. En effet, en cas de panne d'une carte, tous les ports qui lui sont reliés seront en panne.



| Indices | Data |
|---------|------|
| C1 | up |
| C2 | up |
| C3 | down |
| C4 | up |
| C5 | up |
| C6 | up |
| C7 | up |
| C8 | up |
| C9 | up |
| C10 | up |
| C11 | up |
| C12 | up |
| C13 | up |
| C14 | up |
| C15 | up |

Figure 4.29 : Résultats du modèle 1 affichés par OPL



| Names | Data |
|------------------|-------|
| Equipement_Panne | 103 |
| Temps_Panne | 46800 |

Figure 4.30 : Résultats du modèle 2 affichés par OPL

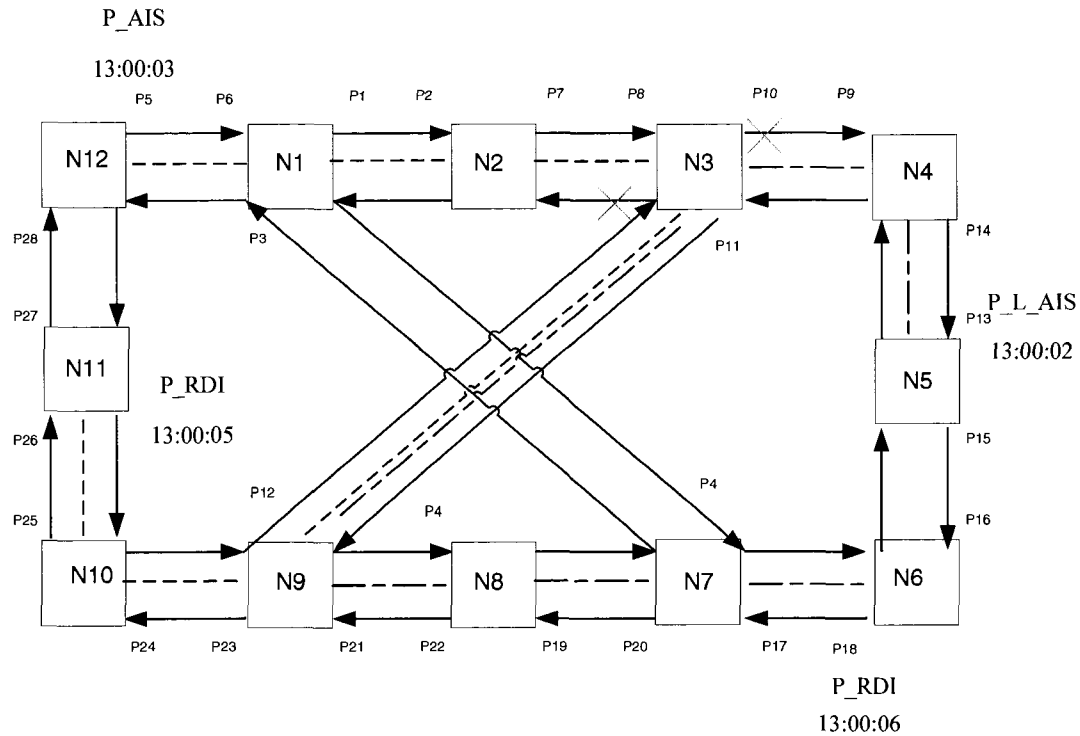


Figure 4.31 : Propagation des alarmes détaillée

Il est important de détecter l'emplacement exact de la panne pendant une durée de temps raisonnable. Cependant, nous avons effectué plusieurs tests pour les deux modèles afin d'évaluer le temps d'exécution en se basant en premier lieu sur le nombre de chemins optiques dans un réseau optique donné. Pour ce faire, nous avons varié le nombre de chemins optiques de un à dix du réseau de la figure 4.16, ayant 48 nœuds optiques. Par la suite, nous avons généré des pannes dans ces derniers. Nous avons constaté que le temps d'exécution pour trouver la panne augmente linéairement, d'une façon adéquate, avec le nombre de chemins optiques (figure 4.32). Nous remarquons aussi que le temps d'exécution du deuxième modèle 2 est inférieur à celui du premier modèle. En deuxième lieu, nous nous sommes basés sur l'effet de la taille des réseaux sur le temps de détection de la panne. Pour ce faire, nous avons généré plusieurs modèles de réseaux de différentes tailles, allant de 10 à 100 nœuds optiques, et nous avons généré des pannes. Nous avons constaté que le temps, pour trouver la panne, augmente aussi linéairement et d'une façon adéquate (figure 4.33). Nous constatons

aussi que le temps d'exécution du deuxième modèle est inférieur à celui du premier modèle. En effet, plus le réseau est grand, plus le nombre de variable du premier modèle augmente et ceci aura un effet sur le temps d'exécution. Par contre, dans le deuxième modèle, le nombre de variables reste petit peu importe la taille du réseau et c'est pour cette raison que nous obtenons un meilleur temps d'exécution.

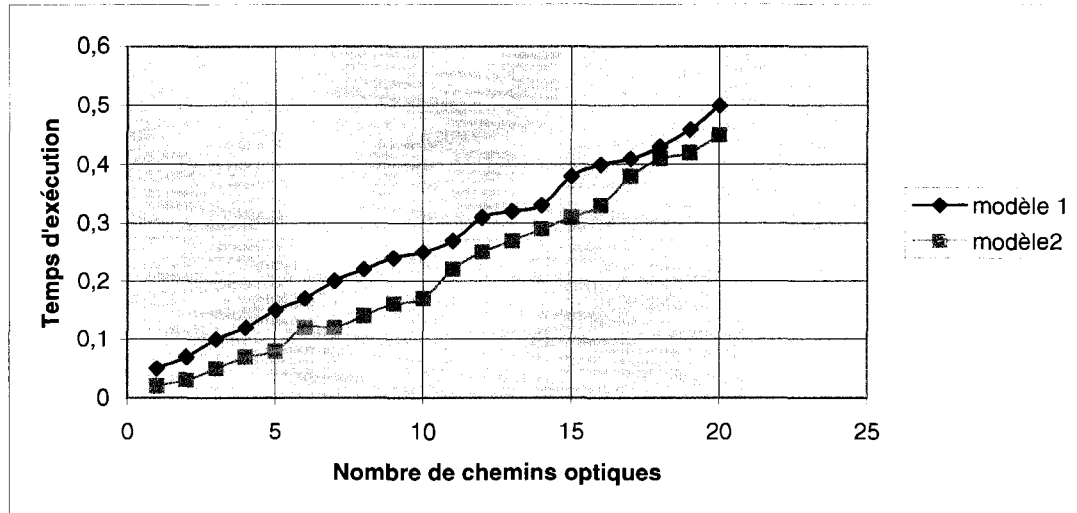


Figure 4.32 : Effet du nombre de chemins optiques sur le temps de détection de la panne

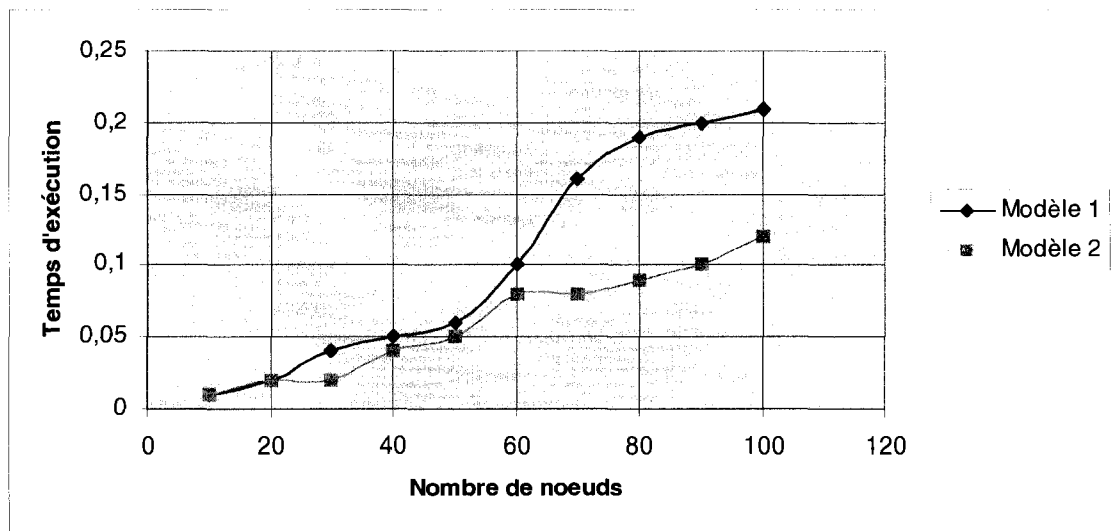


Figure 4.33 : Effet de la taille des réseaux optiques sur le temps de détection de la panne

Chapitre 5 : Conclusion

L'objectif général de notre projet était de proposer une nouvelle approche de détection de pannes dans un réseau optique. Nous présentons dans ce chapitre de clôture une synthèse générale de ce que nous avons abordé dans notre travail ainsi que les limitations de nos travaux. Enfin, nous concluons ce chapitre en abordant les indications de travaux futurs.

5.1 Synthèse des travaux

Après avoir décrit nos principaux objectifs dans le premier chapitre, nous avons présenté dans le deuxième chapitre une brève description des réseaux optiques, les différentes techniques de multiplexage, ainsi que les différents composants d'un réseau optique et les différentes failles qui peuvent y exister. Nous avons traité par la suite les différents types d'alarmes du standard SONET que nous aurons en cas d'une panne ainsi que leurs méthodes de propagation. Plusieurs solutions qui ont été proposées précédemment dans la revue de littérature, afin de détecter les pannes, ont été aussi présentées à la fin de ce chapitre.

Dans le troisième chapitre, nous avons présenté deux modèles qui consistent tout d'abord à définir notre réseau optique. Nous avons introduit par la suite des pannes et nous avons généré des alarmes en se basant sur la norme SONET. Nous nous sommes basés sur la programmation par contraintes pour traiter la gestion de ces alarmes. De ce fait, nous avons défini des contraintes à partir de l'état des équipements et des alarmes observées. Nous avons proposé ainsi un algorithme de résolution en OPL afin de résoudre ce problème et qui propose des diagnostics de pannes tout en tenant compte de l'aspect temporel des alarmes.

Dans le quatrième chapitre, nous avons testé les performances de nos modèles sur plusieurs réseaux de différentes tailles afin d'évaluer leurs comportements en fonction de la taille du réseau. Pour ce faire, nous avons créé deux modèles de réseaux dans lesquels nous avons changé le nombre de chemins optiques et nous avons générés plusieurs pannes dans ces derniers. Nous avons confirmé les résultats trouvés par OPL sur les emplacements des pannes en nous basant sur les différentes méthodes de propagation des alarmes SONET et par la comparaison des résultats donnés par les deux modèles. Cependant, notre premier modèle nous permettait de détecter les pannes simples sans indiquer le moment de ces dernières. Nous avons donc développé un deuxième modèle pour détecter les pannes simples tout en affichant leur moment. Nous avons vu aussi qu'il était important de détecter les pannes pendant une durée de temps raisonnable. Pour ce faire, nous avons effectué plusieurs tests, pour les deux modèles, afin d'évaluer le temps d'exécution en se basant en premier lieu sur le nombre de chemins optiques dans un réseau optique donné. En deuxième lieu, nous nous sommes basés sur l'effet de la taille des réseaux sur le temps de détection de la panne. Nous avons constaté que le deuxième modèle trouve plus rapidement la panne.

En conclusion, nous avons proposé dans notre projet une nouvelle approche de détection des pannes qui se base sur la programmation par contraintes. C'est une méthode qui diffère des autres méthodes développées précédemment dans la littérature. Nous avons pu adopter cette méthode de résolution à notre problème puisqu'il y a un rapprochement naturel entre la propagation des contraintes en PPC et la propagation des alarmes. Nous n'avons besoin que de modéliser le problème sous forme de contraintes qui permettent d'explorer le domaine des solutions tout en assurant une solution adéquate.

5.2 Limitations des travaux

Nous avons supposé dans nos modèles que nous recevons toujours des alarmes et nous ne nous sommes pas intéressés à l'exactitude de l'existence de ces alarmes. D'une part, nous n'avons pas tenu compte, dans notre démarche, des fausses alarmes. Ces dernières sont dues aux problèmes de transmission. Ainsi, à partir de ces fausses alarmes reçues, nous aurons une interprétation inadéquate de l'emplacement de la panne. D'autre part, la perte des alarmes peut engendrer également une mauvaise interprétation. En effet, supposons que nous avons une panne dans notre réseau, des alarmes seront alors générées et envoyées au gestionnaire du réseau. Ces dernières peuvent être perdues et en l'occurrence, le gestionnaire du réseau ne recevra pas ces dernières. De ce fait, l'information reçue peut devenir incomplète ou incohérente.

Enfin, nous avons proposé une démarche afin de détecter les pannes simples dans un réseau optique donné et nous n'avons pas pris en considération les pannes multiples. En effet, sur un chemin optique, nous pouvons avoir une ou plusieurs pannes. Nous avons supposé dans notre travail qu'il va y avoir une corrélation des pannes. C'est-à-dire, s'il y a une panne dans un lien donné sur un chemin optique, tous les liens qui le suivent seront systématiquement en panne puisqu'ils ne reçoivent pas de données.

5.3 Travaux futurs

En premier lieu, nous envisageons une amélioration de notre travail en considérant les fausses alarmes et les alarmes perdues. De ce fait, des approches se basant sur des méthodes probabilistes pourront compléter notre modèle. En effet, nous pourrions associer à chaque alarme une probabilité d'être fausse ou perdue. Ainsi, lorsqu'une alarme est perdue (ou elle est fausse), la probabilité pour qu'elle soit effectivement perdue (ou fausse) permet de connaître l'éventuel état du réseau.

Par ailleurs, les probabilités permettent de fournir un degré de validité du diagnostic de pannes pour une observation donnée.

En deuxième lieu, nous pouvons améliorer notre modèle en tenant compte de la détection des pannes multiples. En effet, un réseau optique peut avoir une ou plusieurs pannes sur le même chemin optique. De ce fait, nous pouvons nous baser sur la méthode de programmation par contraintes afin de traiter ce cas.

Références

- [1] C.MAS et P.THIRAN, “An efficient algorithm for locating Soft and hard failure in WDM Networks,” *IEEE Journal on Selected Areas Communications*, vol. 18, no.10, pp.1900-1911, 2000.
- [2] S. STANIC, S. SUBRAMANIAM, H.CHOI, G.SAKHIN et H.CHOI, “Efficient Alarm Management in Optical Networks,” in *DARPA Information Survivability Conference and Exposition*, vol. 1, 2003, pp. 252-260.
- [3] I.KATZELA et M. SCHWARTZ, “Schemes for fault identification in Communication Networks,” *IEEE/ACM Transaction On Networking*, vol. 3, no. 6, pp. 753 – 764, 1995.
- [4] E. ABOELELA ET C. DOULIGERIS, “Switching Theory Approach to alarm correlation in network management,” in *Proceedings of the 25th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks*, p. 452, 2000.
- [5] P. LECOY, *Principes et technologies des télécoms*, Hermes : Science Publications, 2005.
- [6] J. FRANÇOIS, (1997), *La fibre optique en image*. Consulté le 1 septembre 2007, tiré de <http://www.htr.ups-tlse.fr/pedagogie/cours/fibre/welcome.htm>.
- [7] E. CAMISARD, (2001), *La fibre optique*. Consulté le 1 septembre 2007, tiré de http://www.renater.fr/IMG/pdf/Partie1_-_Fibre_optique.pdf.
- [8] A.TANENBAUM, *Réseaux*, 4^e édition, Paris : Pearson Education, 2003.

- [9] G. PUJOLLE, *Les réseaux*, 4^e édition, Paris : Eyrolles, 2003.
- [10] C. MAS, "Fault location algorithms for optical networks," Ph.d, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse, 2000.
- [11] M.BRISSE, "Recherche locale basée sur les contraintes pour la planification d'horaires de ligues sportives," M.Sc.A., École Polytechnique de Montréal, Qc, Canada, 2004.
- [12] ILOG: ILOG Solver 6.0 Reference Manual, 2003.
- [13] ILOG: ILOG Solver 6.0 User's Manual, 2003.
- [14] C.MAS et P.THIRAN, "An efficient fault localization algorithm for IP/WDM networks," in *IEEE/ACM/SPIE Workshop on Optical Networks*, 2000.
- [15] C.MAS ET P.THIRAN, "A review on fault location methods and their application to optical networks," *Optical Network Magazine*, vo. 2, pp. 73-87, 2001.
- [16] O. ADAMUS, J.COPIN et E.PANETTA, (2003), *Nouvelles technologies réseaux SONET/WDM*. Consulté le 10 septembre 2007, tiré de <http://www-igm.univ-mlv.fr/~duris/NTREZO/index.html>.
- [17] CISCO, *Troubleshooting Physical Layer Alarms on SONET and SDH Links*. Consulté le 1 octobre 2007, tiré de http://www.cisco.com/warp/public/127/sonetalarms_16154.html.

- [18] E.Fleury, (2002), *Réseaux optiques WDM / SONET*. Consulté le 12 septembre 2007, tiré de
http://tc-net2.insa-on.fr/lutece/download/Microsoft_PowerPoint___LMW_07_WDM.pdf
- [19] K.MARIOT et P. J.STUCKEY, *Programming with Constraints : An Introduction*, Cambridge, Massachusetts, 1998.
- [20] C. A.SHAFER, *A practical Introduction to Data Structures and Algorithm analysis*, 2^e edition, Virginia Tech, 2001.
- [21] J.B. THOMINE et L.L.FUR. *La technologie des fibres optiques*. Consulté le 12 septembre 2007, tiré de
<http://www.axiom.fr/Presentations/Technologie%20%C3%A0%20FO%20V2.pdf>.
- [22] B.STEPHEN et V.ZVONKO, *Fundamentals of Digital Logic With VHDL Design*, 2^e edition, McGraw-Hill Companies, 2000.